



UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE IMÁGENES DE PRECIPITACIÓN DE UN RADAR
METEOROLÓGICO A DIFERENTES RESOLUCIONES ESPACIOS-TEMPORALES
EN LA CUENCA ALTA DEL RIO PAUTE”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Ambiental

Autor:

Carlos Andrés Ambrosi Moreira

C.I.: 0105494702

Director:

Ing. Alex Manuel Áviles Añazco PhD.

C.I.: 0102247186

CUENCA – ECUADOR

2017



EVALUACIÓN DE IMÁGENES DE PRECIPITACIÓN DE UN RADAR METEOROLÓGICO A DIFERENTES RESOLUCIONES ESPACIOS-TEMPORALES EN LA CUENCA ALTA DEL RIO PAUTE

RESUMEN

La demanda de los recursos hídricos debido al crecimiento de distintas áreas de producción, como: agricultura, ganadería, electricidad, industrial, etc. se han incrementado en las últimas décadas. Consecuentemente, es indispensable entender las características que gobiernan el ciclo hidrológico. Los recursos hídricos han sido estudiados mayoritariamente en los páramos de nuestro país. El Ecuador posee características únicas en cuanto a sus procesos hidro-meteorológicos debido a los efectos que pueden producir la zona de convergencia intertropical, la orografía y las masas de aire provenientes del pacífico y la amazonia. Como soporte para el estudio del comportamiento de la precipitación, se implementó un radar meteorológico denominado CAXX en el límite norte del Parque Nacional del Cajas, el radar registra inicialmente valores de reflectividad (Z) en [dbZ], los cuales son convertidos a tasa de lluvia [mm/h] a partir de una ley de potencia $Z = A R^b$ donde A y b son coeficientes empíricos. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar las estimaciones de precipitación de las imágenes del radar CAXX a partir de cuatro funciones $Z = A R^b$: a) utilizada por defecto en el equipo y b) tres funciones adicionales adaptadas con datos locales. Mediante la comparación con los datos observado en sensores pluviométricos a diferentes resoluciones espacio-temporales. El método de comparación entre imágenes de radar y datos de pluviómetros en tierra, se efectuó en bases a errores estadísticos: Abs-Bias, raíz del error medio cuadrado y coeficiente de determinación. Con este estudio se evaluó la precisión de las estimaciones de radar a nivel temporal y espacial.

Palabras clave: Radar meteorológico, precipitación, Parque Nacional Cajas-Ecuador.



ABSTRACT

The demand for the use of water resources due to the growth of the different production areas, such as: agriculture, livestock, electric generation, industrial, etc. Have increased in recent decades. Therefore, it is essential to understand the characteristics that govern the hydrological cycle. Water resources have been studied with greater interest in the paramos of our country. Ecuador possesses unique characteristics in terms of its hydro-meteorological processes due to the effects of the intertropical convergence zone, orography and air masses from both the Pacific and the Amazon. As a support for the study of precipitation behavior, a meteorological radar called CAXX was implemented at the northern boundary of the Cajas National Park, the radar initially recorded reflectivity values (Z) in [dbZ], which are converted at the rate of rain in [mm/h] from a power law $Z = A R^b$ where A and b are empirical coefficients. The present study aimed to evaluate the precipitation estimates of the CAXX radar images from four functions $Z = A R^b$: a) used by default in the equipment and b) three additional functions adapted with local data. By comparison with the data observed in pluviometric sensors at different temporal space resolutions. The method of comparison between radar images and ground-based rain gauge data was based on statistical errors: Abs-Bias, root mean square error and coefficient of determination. This study evaluated the accuracy of radar estimates at the temporal and spatial level and also generated a baseline on the evaluation of the images in their primary state, without additional calibrations

Key words: Meteorological radar, precipitation, Cajas-Ecuador National Park.



Índice general

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 9 |
| 1.1. Antecedentes | 9 |
| 1.2. Justificación..... | 10 |
| 1.3. Objetivos | 12 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 12 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 12 |
| 2. Marco teórico | 13 |
| 2.1. Precipitación y monitoreo | 13 |
| 2.2. Radar meteorológico y calibración | 14 |
| 2.3. Variabilidad espacial y temporal de la precipitación | 16 |
| 3. Materiales y métodos..... | 17 |
| 3.1. Área de estudio | 17 |
| 3.2. Descripción de los datos de precipitación in-situ..... | 19 |
| 3.2.1. Pre-procesamiento de datos | 20 |
| 3.3. Medidas de evaluación..... | 20 |
| 3.3.1. Cálculo de precipitación horaria y cada 15 minutos | 20 |
| 3.3.2. Estadísticos de bondad de ajuste | 22 |
| 4. Resultados y discusión | 25 |
| 4.1. Agregaciones horarias y cada 15 minutos. | 25 |
| 4.1.1. Pre-procesamiento de datos | 25 |
| 4.1.2. Cálculo de precipitación horaria y cada 15 minutos | 25 |
| 4.2. Análisis de los estadísticos de bondad de ajuste. | 26 |
| 4.2.1. Análisis de los estadísticos de bondad de ajuste de acuerdo a las agregaciones temporales de 15 minutos y 1 hora..... | 30 |
| 4.2.2. Tendencia de ajuste de las cuatro ecuaciones del radar meteorológico con respecto a cada estación pluviométrica. | 33 |
| 4.2.3. Evaluación de las resoluciones del tamaño de pixel que corresponden a 100m, 250m y 500m para los tres estadísticos de bondad de ajuste | 35 |
| 5. Conclusiones y Recomendaciones..... | 38 |
| 5.1 Conclusiones..... | 38 |



| | |
|--|----|
| 5.2 Recomendaciones | 39 |
| 6. Referencias..... | 40 |
| 7. Anexos..... | 43 |
| Anexo 1. Algoritmo en R para extraer las estimaciones del radar meteorológico en la grilla correspondiente a cada estación..... | 43 |
| Anexo 2. Cálculo de estadísticos de ajuste..... | 50 |
| Anexo 3. Test de significancia | 51 |



Cláusula de derechos de autor



Universidad de Cuenca
Cláusula de derechos de autor

Carlos Andrés Ambrosi Moreira, autor del Trabajo de Titulación "EVALUACIÓN DE IMÁGENES DE PRECIPITACIÓN DE UN RADAR METEOROLÓGICO A DIFERENTES RESOLUCIONES ESPACIO-TEMPORALES EN LA CUENCA ALTA DEL RIO PAUTE", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi Título de Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 15 de mayo de 2017

Carlos Andrés Ambrosi Moreira
C.I: 0105494702



Cláusula de propiedad intelectual



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

Carlos Andrés Ambrosi Moreira, autor del Trabajo de Titulación “EVALUACIÓN DE IMÁGENES DE PRECIPITACIÓN DE UN RADAR METEOROLÓGICO A DIFERENTES RESOLUCIONES ESPACIOS-TEMPORALES EN LA CUENCA ALTA DEL RIO PAUTE”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de mayo de 2017

Carlos Andrés Ambrosi Moreira
C.I: 0105494702



AGRADECIMIENTO

Gracias, de todo corazón, a todos mis profesores que compartieron sus conocimientos, en especial al ingeniero Alex Avilés, quien dirigió este estudio, a la ingeniera Johanna Orellana Alvear gracias por su, paciencia, dedicación, motivación, criterio y ayuda. Ha sido un privilegio poder contar con su guía. A la colaboración de Dani Balleri Phd, por poner a disposición el uso de sus scripts para la realización de esta tesis. Gracias a todo el personal del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca por su atención y amabilidad y por proveer la información empleada para la investigación. Finalmente con todo mi amor gracias a mi familia mi madre Elizabeth Moreira, mi padre Leónidas Ambrosi y hermanos Johana y Jonathan por su apoyo incondicional.

Carlos Andres Ambrosi Moreira

Cuenca, Abril 2017



1. Introducción

1.1. Antecedentes

La demanda por el uso de los recursos hídricos debido al crecimiento de las distintas áreas de producción, como: agricultura, ganadería, generación eléctrica, industrial, etc. se han incrementado en las últimas décadas. Además los seres vivos dependen de ella como fuente de agua dulce para los ecosistemas y por ende vital para la supervivencia de las especies que necesitan de este recurso. Por lo tanto, es indispensable entender las características que gobiernan el ciclo hidrológico.

Entre las distintas fases del ciclo hidrológico, se encuentra la precipitación; en meteorología, la precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre; este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo (Organización Meteorológica Mundial, 1993). Para entender la precipitación, se han creado distintos modelos hidrológicos, como los basados en regresiones lineales (Nieto, 2007). Mediante el análisis de imágenes satelitales (García, 2014) o mediante técnicas de interpolación para la observación espacial de la precipitación (Reinoso, 2015).

Según Castro, 2014 Debido a los altos costos de adquisición, instalación y mantenimiento de los equipos meteorológicos, para países en vías de desarrollo la estimación de precipitación es una tarea complicada. Dentro de ello, (Castro, 2014) señala que Ecuador, cuenta con una red pluviométrica deficiente, además la información meteorológica de la que dispone, posee una gran variabilidad espacial, lo cual se debe al relieve de alta montaña que presenta. En lo referente a los pluviómetros, se sabe que ofrecen información de la precipitación de forma puntual de la zona en donde se encuentra ubicado (Padrón Flasher, 2013); En consecuencia, la variabilidad espacial de la precipitación sobre una región, no puede ser representada adecuadamente

Los productos de radares meteorológicos son una eficaz herramienta para estimar precipitación, ya que proveen datos continuos espacialmente y a



intervalos temporales regulares (mensuales, diarios, horarios). Además son fundamentales para obtener estimaciones de zonas en las cuales no se han colocado pluviómetros, o la información con la que se cuenta es escasa o incompleta, con periodos de tiempo sin registros (Castro Loayza, 2014) sin embargo, para que la información suministrada por radares meteorológicos sea confiable es necesario un extenso proceso de calibración. Debido a que los radares no son capaces de registrar directamente la intensidad de la lluvia (R) en [mm/h] sino por el contrario son capaces de medir reflectividad (Z) en [dbZ], el primer paso para este proceso de calibración es la identificación de una ley de potencia $Z = A R^b$ para obtener la unidad deseada.

Este estudio contribuirá a generar un punto de partida sobre la evaluación de imágenes de radar transformadas a partir de cuatro relaciones $Z = A R^b$, una de ellas ampliamente usada en literatura pero que podría no ajustarse a la realidad regional y las tres adicionales adaptadas con datos locales. Es decir esta evaluación permitirá generar una línea base para conocer el alcance de la estimación de precipitación del radar a distintas resoluciones espacio-temporales en este primer paso del proceso de calibración sin correcciones.

1.2. Justificación

En el Ecuador, el Plan Nacional para el Buen Vivir, en su objetivo tres, reconoce la gran vulnerabilidad del país ante amenazas naturales, por lo que establece como política nacional “Garantizar la preservación y protección integral del patrimonio cultural y natural y de la ciudadanía ante las amenazas y riesgos de origen natural o antrópico” (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2013). Así mismo, en el objetivo siete se promueve la sostenibilidad ambiental, pretendiendo entre otros, garantizar la protección de la población, reconociendo a las obras de prevención como una herramienta útil para lograr este objetivo.

En el Ecuador, los radares meteorológicos serán usados como una fuente importante de predicción de clima a corto plazo, aunque para poder utilizar esta



valiosa herramienta con todo su potencial se debe realizar una evaluación para conocer el alcance de la estimación de precipitación.

Un radar meteorológico de banda X, denominado CAXX se ha implementado recientemente en el límite norte del Parque Nacional del Cajas en el cerro Paragüillas a una altitud de 4450 m.s.n.m. El Radar es operado por la Subgerencia de Gestión Ambiental de ETAPA EP, el cual cubre las provincias andinas Azuay, Cañar y parte del sur de la provincia costera Guayas; y genera imágenes a tres resoluciones diferentes cada 5 minutos. De acuerdo al alcance de la señal del radar: 20Km, 60Km y 100Km de radio, las resoluciones de tamaño de pixel corresponden a 100m, 250m y 500m respectivamente. Esto representa para la provincia del Azuay tener una densidad de 31000 estaciones automáticas de precipitación. El conocimiento de la distribución espacial de precipitación es un importante suministro para manejo de pronóstico del tiempo (precipitación, intensidad y distribución); desastres naturales (inundaciones y deslizamientos), análisis de la red de alcantarillado y canales; predicción de caudales, entre otras que benefician el desarrollo territorial

Por lo tanto, es necesario desplegar una investigación sobre la evaluación de las imágenes del radar meteorológico CAXX en su estado primario es decir sin calibraciones adicionales que permita conocer el alcance de una estimación de tasa de lluvia, y poder entender el comportamiento tanto espacial como temporal de la precipitación dentro de la cuenca alta del Rio Paute.

El presente estudio pretende validar la primera etapa de calibración del radar CAXX, es decir evaluar las estimaciones del radar a partir de cuatro relaciones Z-R considerando diferentes resoluciones espaciales (tamaño de pixel) y escala temporal (acumulación de precipitación horaria y cada 15 minutos). La primera de las relaciones Z-R constituye la relación definida por (Marshall & Palmer, 1948) que es utilizada comúnmente como un valor por defecto en la instalación de nuevos radares y las tres adicionales relaciones Z-R ajustadas a partir de datos locales. Estas últimas se ha obtenido a partir de un análisis que forma parte de un proyecto cooperativo de ETAPA y la Universidad de Cuenca.



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la precipitación estimada de un radar meteorológico a partir de cuatro modelos de relaciones Z-R a una escala temporal (acumulación de precipitación horaria y cada 15 minutos) en imágenes de un radar meteorológico, a tres diferentes resoluciones espaciales, mediante la comparación con datos observados en sensores pluviométricos, en la cuenca alta del Rio Paute

1.3.2 Objetivos específicos

- 1) Obtener los subtotales horarios y cada 15 minutos, de las observaciones realizadas en los sensores pluviométricos e imágenes del radar-meteorológico, en la cuenca alta del Rio Paute
- 2) Efectuar un análisis estadístico de las estimaciones horarias y cada 15 minutos del radar-meteorológico respecto a las observaciones de los sensores pluviométricos en la cuenca alta del Rio Paute



2. Marco teórico

2.1. Precipitación y monitoreo

La precipitación es el fenómeno atmosférico mediante el cual el agua que se encuentra en forma de vapor en la atmósfera retorna a la superficie terrestre, sea esta de forma líquida o gaseosa. Esto sucede cuando la atmósfera se satura de vapor de agua por lo que se condensa, vence la resistencia del aire y precipita. La saturación de una masa de aire podría deberse al aumento de humedad o a la disminución de la temperatura, lo cual genera una compleja dinámica produciendo diferentes tipos de resultados en la precipitación. (Reyes Coca, 2001), Existen diferentes tipos de lluvia que responden a procesos distintos de generación de lluvia como por ejemplo: lluvias orográficas que son aquellas producidas por nubes que se encuentran en su ascenso con obstáculos orográficos, produciendo el enfriamiento de la nube y la precipitación; lluvias convectivas que son aquellas que se dan debido al ascenso directo de aire caliente de la superficie a estratos mayores formando densas nubes llamadas cumulonimbos las cuales posteriormente precipitan; entre otras. (Maderey Rascón, 2005).

El nivel de detalle de la precipitación puede ser monitoreada de acuerdo a las capacidades y precisión de los distintos instrumentos de medición. Existen diferentes maneras de monitorear la lluvia; a nivel terrestre, una forma manual y rudimentaria es el uso de un recipiente abierto con el diámetro del orificio conocido para después extrapolar la cantidad de lluvia almacenada a un área determinada. En la actualidad, el uso de sensores como pluviómetros de balancín y disdrómetros es más común, los cuales replican el principio anterior con un mayor grado de precisión. Con el avance tecnológico, se han desarrollado nuevas formas y equipos de monitoreo. Así, tenemos los radares meteorológicos. Los cuales a pesar de ser instalados a nivel terrestre son capaces de monitorear la precipitación antes de que las gotas de agua alcancen el suelo. (Berne et al, 2014)

2.2. Radar meteorológico y calibración

El radar meteorológico funciona de manera parecida a un faro, la antena de este gira continuamente para iluminar o barrer los objetivos que se desean observar en un cierto volumen de la atmósfera. El radar emite una onda electromagnética que al colapsar con un hidrometeoro, una parte de esta onda retorna al radar, siendo esta la medida que se almacena. Esta magnitud es conocida como reflectividad (Z) y es en efecto la unidad de medida de un radar meteorológico es capaz de registrar. La reflectividad se mide en decibelios (dBz). Por debajo de 12 dBz generalmente no existe precipitación, mientras que valores por encima de 60 dBz indican precipitaciones muy intensas. (Pellejo Ibáñez, 2009)

La estimación de la tasa de lluvia (R) [mm/h] se efectúa indirectamente a partir de la variable de reflectividad (Z). Ambas variables están relacionadas ya que son dependientes de la distribución de tamaño de gotas, la cual está sujeta a constantes variaciones de un evento de lluvia a otro, incluso dentro de un mismo evento esta distribución de gotas presenta variabilidad espacio-temporal (Zawadzki, 1984; Joss y Zawadzki, 1997).

A partir de datos experimentales de Z y R se ha evidenciado la existencia de una relación empírica entre ambas variables denominada relación Z - R (Marshall y Palmer, 1948; Rinehart, 2007) y se expresa en base a la ley de potencia:

$$Z = a R^b$$

Los coeficientes a y b de la función son constantes empíricas. La intensidad de la precipitación (R) es un producto del contenido másico y de la velocidad de caída en un volumen de medición de radar. No existe una relación única entre la reflectividad del radar y la intensidad de las precipitaciones, ya que los coeficientes a y b varían con el origen y tipo de lluvia, la distribución del tamaño de las gotas, localización geográfica, condiciones meteorológicas, entre otros (Rinehart, 2007). Históricamente se determinaron muchas relaciones para radares bajo diferentes situaciones geográficas, distintas latitudes y condiciones

de tormenta. Algunos de los coeficientes citados en la literatura para diferentes eventos meteorológicos se observan en la (Tabla 1).

Tabla 1: Resumen de coeficientes Z-R citados en la literatura para diferentes eventos meteorológicos.

| | A | B | Tipo de precipitación |
|-------------------------------|-----|------|--|
| Marshall y Palmer (1948) | 200 | 1,6 | Homogéneas y |
| Blanchard (1953) | 31 | 1,71 | estratiformes |
| Jones (1956) | 486 | 1,37 | Orográficas |
| Joss y Waldvogel (1967) | 230 | 1,4 | Convectivas |
| Joss y Waldvogel (1967) | 400 | 1,3 | Medias |
| Joss y Waldvogel (1967) | 100 | 1,4 | Convectivas |
| Smith et al (1975) | 150 | 1,88 | Procesos frontales |
| Sempere -Torres, et al (1999) | 525 | 1,33 | Convectivas con granizo Convectivas medias |

Fuente: Belmonte, 2014

Desafortunadamente, la calibración de un radar meteorológico representa una tarea más allá de la identificación de la relación Z-R de ajuste. Factores como la atenuación de la señal a través de la distancia, efecto de advección, obstáculos de visibilidad entre otros deben ser corregidos para obtener mejores estimaciones. Este suele ser un proceso sistemático que permite añadir complejidad al proceso de calibración por etapas.

Núñez, (1996) Se discuten algunas de las ventajas y desventajas del uso de equipos de teledetección como radares y satélites en contraposición a equipos de medición puntuales en tierra como pluviómetros, sobre todo los relativos a localización, posicionamiento y representatividad de redes de observación.

Según Núñez, (1996) Entre las ventajas de los radares meteorológicos están:
a) La capacidad de exploración remota y tridimensional de amplias regiones sin la necesidad de mantener una densa red de equipos. b) La rapidez de captura de estos datos, estos equipos pueden suministrar millones de datos en poco tiempo y c) el continuo suministro de imágenes casi en tiempo real. Por otra parte, entre algunas de las desventajas se mencionan: a) la dificultad para

calibrar las medidas, pues éstas se deben ser calibradas con precipitación real y
b)El promediado espacial de la medida al tamaño del pixel.

2.3. Variabilidad espacial y temporal de la precipitación

El conocimiento sobre variabilidad espacial de la precipitación, es quizás el mayor beneficio que se espera obtener de los datos de radar meteorológico. (Krajewski & Ciach, 2003) a partir estudio realizado en Brasil, Florida, Iowa, Oklahoma y Guam, demostraron la gran dependencia de los patrones que dominan la precipitación en las escalas espaciales y temporales a las que se mide esta variable, dando a conocer también, la relación existente entre la distancia de dos puntos y la probabilidad de encontrar características similares en la precipitación, de esta manera se demuestra que mientras más nos apartamos de un punto en el espacio las características de esta variable cambian notablemente incluso para distancias menores al kilómetro.

Goodrich, et al., (1995) en su estudio realizado en una micro cuenca en Arizona concluyo que la variabilidad de la precipitación también se da en pequeñas escalas espaciales. Esta declaración ha creado gran controversia debido a la práctica común de utilizar solo un pluviómetro para la representación de la lluvia para toda una cuenca. Las conclusiones revelan que el gradiente de precipitación es de 1,2 mm en 100 m como promedio, es decir que cada 100 m la lluvia puede aumentar o disminuir 1.2 mm, teniendo una variabilidad del 4 al 14 % en 100 m.

La incertidumbre en los datos de lluvia, no solo depende del espacio que un equipo de medición puede representar, sino por el progreso de la precipitación en el tiempo. (Padrón & Céleri, 2013), en su estudio de la variabilidad temporal de la lluvia en una micro cuenca del rio Zhurucay a 85 km de la ciudad de Cuenca determinó que puede llegar a existir una diferencia de 175 mm de lluvia entre el mes más lluvioso y el mes más seco. Además demostró como la lluvia se presenta en diferentes horas del día de acuerdo a cada mes, lo que en escalas de tiempo mayores no se puede observar y que sin embargo obedecen a distintos procesos de generación de lluvia.



3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

El presente estudio será desarrollado en la cuenca alta del río Paute, dentro de las coordenadas UTM (Datum WGS 84) en la parte más alta 698396E 9665964N y en la parte baja, 713544E 9659449N. Esta se encuentra en la región austral del Ecuador, específicamente en los Andes Centro Sur, correspondiendo su territorio a lo que comúnmente se denomina la hoya del Paute, ubicada entre las Cordilleras Oriental (límite este) y Occidental de los Andes (límite oeste); y entre los Nudos de Curiquingue (límite norte) y de Portete (límite sur).

Su superficie, es aproximadamente de 5.000 km^2 , correspondiendo al 1,85% de toda la superficie del Ecuador (272.000 km^2). Política y administrativamente forma parte de la provincia del Azuay en un 74,82%, de la provincia del Cañar en un 13,31%, de la provincia de Chimborazo en un 11,57%, y el 0,28% restante pertenece a la provincia de Morona Santiago. (Donoso, 2002)

Además, en esta zona se encuentra el Observatorio Ecohidrológico Quinuas, ubicado en la cabecera del río Tomebamba que desemboca en el río Amazonas y éste en el Océano Atlántico, con un rango de elevación entre 2600 a 4000 m s. n. m. De acuerdo al mapa Geológico de la República del Ecuador (1982), y es aquí concretamente el área de estudio la cual desarrolla en el Parque Nacional Cajas hasta la ciudad de Cuenca. La Figura 2 muestra la ubicación del área de estudio ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

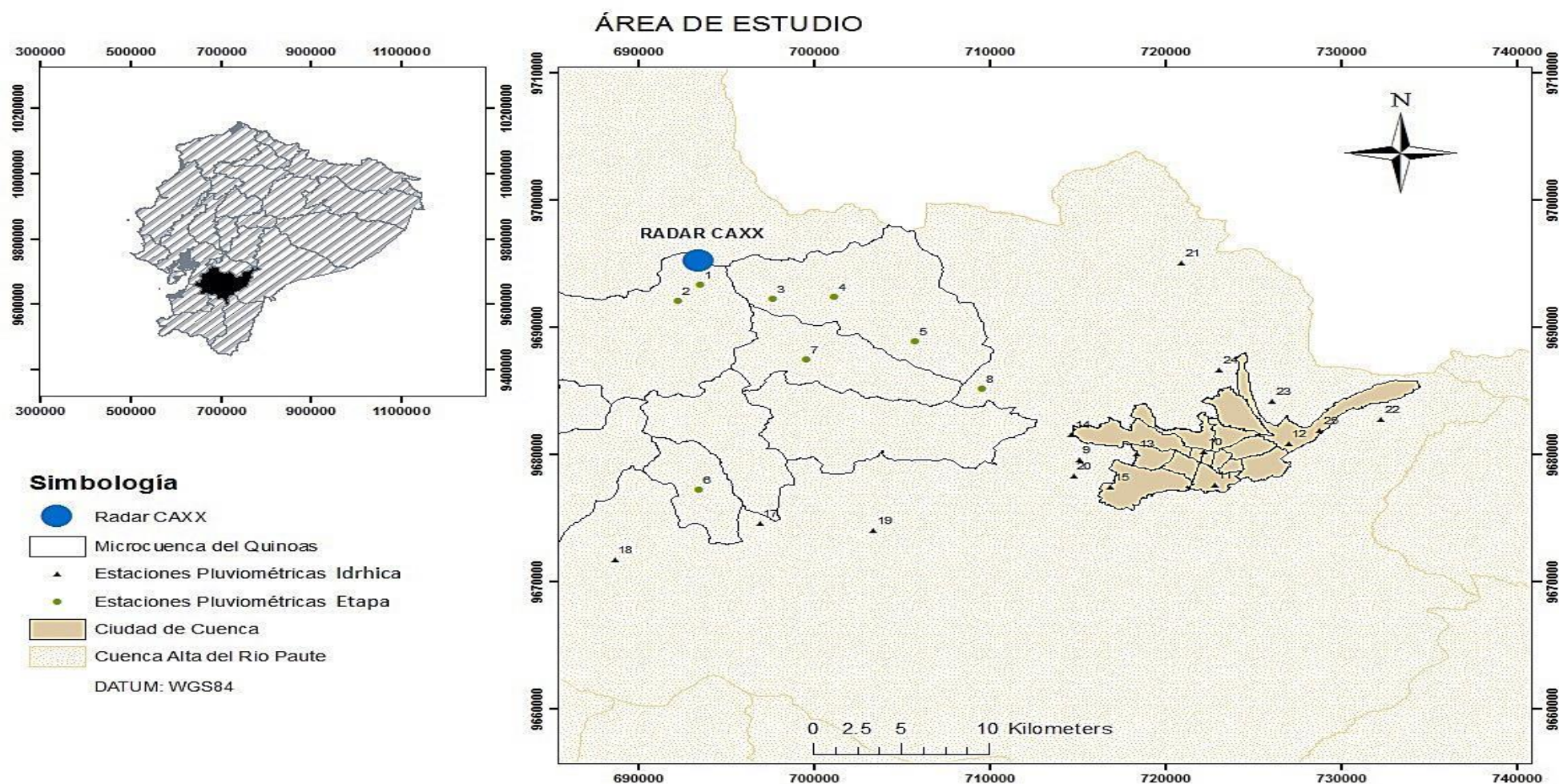


Figura 1. Zona de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

3.2. Descripción de los datos de precipitación in-situ

Los datos de precipitación utilizados en el presente proyecto corresponden a 13 estaciones pluviométricas pertenecientes al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca IDRHICA y 12 estaciones pertenecientes a la empresa ETAPA EP, en el periodo lluvioso abril-mayo 2015 (Figura 1). La Tabla 2 indica el listado de estaciones pluviométricas y su ubicación. Además se dispone de 3 imágenes generadas por el radar en el mismo periodo lluvioso abril-mayo 2015, con distintos alcances a 20km, 60km y 100km que corresponden a una resolución de imágenes espaciales de 100, 250 y 500 metros, respectivamente.

Tabla 2: listado de estaciones pluviométricas y su ubicación

| Código | Nombre | Coord. (X) | Coord. (Y) | Altura (msnm) |
|----------------|----------------------|---------------|---------------|------------------|
| Idhrica | | | | |
| CH01 | PLUVIO.CASA.ANA | 9679628 | 715049 | 2655 |
| CH02 | PLUVIO.ZONA.MILITAR | 9680256 | 722146 | 2568 |
| CH03 | BODEGAS.ETAPA | 9677604 | 722749 | 2518 |
| CH04 | PLUVIO.CASA.MARIO | 9680898 | 726933 | 2476 |
| CH05 | BALZAY | 9680121 | 718285 | 2603 |
| CH06 | OPNC | 9685135 | 709548 | 3060 |
| CH07 | CHIRIMACHAY | 9688895 | 705703 | 3298 |
| CH08 | VIRGEN | 9692382 | 701110 | 3626 |
| CH09 | TOREADORA | 9692227 | 697618 | 3955 |
| CH10 | ROQUE.PRADO | 9693335 | 693494 | 3935 |
| CH11 | HUAGRAUMA | 9692069 | 692246 | 3770 |
| CH12 | SAYAUSI | 9681624 | 714620 | 2712 |
| CH13 | PLUVIO.CASA.ESTEBAN | 9677467 | 716820 | 1811 |
| Etap | | | | |
| CE14 | CHAUCHA | 9679160 | 672548 | 1896 |
| CE15 | IZHCAYRRUMI.CABECERA | 9677234 | 693422 | 3748 |
| CE16 | SOLDADOS.EN.PTAR | 9674608 | 696891 | 3269 |
| CE17 | CANCAN.SOLDADOS | 9671795 | 688622 | 3700 |
| CE18 | YANUNCAY.EN.PUCAN | 9674079 | 703349 | 3000 |
| CE19 | HUIZIL | 9678318 | 714747 | 2773 |
| CE20 | MAMAMAG.CAMPING | 9687482 | 699520 | 3592 |
| CE21 | SAUCAY | 9695100 | 720890 | 2979 |
| CE22 | CHAULLABAMBA | 9682775 | 732240 | 2521 |
| CE23 | RICAUARTE | 9684215 | 726027 | 2600 |
| CE24 | TIXAN | 9686691 | 723026 | 2708 |
| CE25 | UCUBAMBA | 9681876 | 728722 | 2425 |
| Datum | WGS 84 | | | |

3.2.1. Pre-procesamiento de datos

La calidad de datos de la precipitación de las redes meteorológicas de las estaciones seleccionadas en campo determina el grado de confiabilidad de la evaluación del radar meteorológico. Por ende es vital contar con una base de datos de precipitación robusta con la cual cotejar las estimaciones del radar meteorológico de manera que el estudio sea relevante. En la descarga de datos de las estaciones ocurren situaciones como errores sistemáticos, cambios en los procedimientos de observación, del espectador, etc. Por lo tanto es importante revisar la base de datos que estén corregidos cualquier error.

Primero se analizaron los datos de precipitación tanto de IDHRICA y ETAPA-EP mediante curvas de masa para verificar la calidad de datos, con estos resultados se eliminaron del análisis dos estaciones pluviométricas (campus Yanuncay, campus Central).

3.3. Medidas de evaluación

Los métodos de evaluación se obtuvieron de trabajos correspondientes (Feidas, 2010; Scheel et al., 2011; Su, Hong, & Lettenmaier, 2008), que se basan en Estadísticos de bondad de ajuste. Se realizó una evaluación puntual; es decir, las series de datos de precipitación estimada por los pluviómetros en cada estación se comparan con las estimaciones del radar en las grillas correspondientes a las estaciones (Castro, 2014)

3.3.1. Cálculo de precipitación horaria y cada 15 minutos

Mediante el software Microsoft Excel 2010® se calculó la precipitación horaria y cada 15 minutos de los registros de los pluviómetros. Para el caso de las imágenes de radar, el cálculo de transformación a escala horaria y cada 15 minutos requiere un procesamiento previo de conversión a tasa de lluvia en [mm/h] a partir de la variable reflectividad (Z) a través de una ley de potencia, también conocida como relación Z - R . Esta transformación permite homologar la unidad de medición de ambos sensores: pluviómetros y radar meteorológico y



así realizar la evaluación puntual. Es decir, las series de datos de precipitación registrada por los pluviómetros en cada estación se comparan con las estimaciones del radar en las grillas correspondientes a las estaciones.

Cuatro relaciones $Z = a R^b$ serán evaluadas en este estudio. La primera utilizando la conocida función de (Marshall & Palmer, 1948) $Z = 200 R^{1.6}$; la segunda relación que se ha obtenido a partir de datos locales de un disdrómetro $Z = 44.44 R^{0.96}$ que pertenece a comportamiento de llovizna; la tercera relación también se ha obtenido de datos locales de un disdrómetro $Z = 68.8 R^{1.17}$ que pertenece a comportamiento de lluvia moderada y la cuarta relación también se ha obtenido de datos locales de un disdrómetro $Z = 235 R^{1.2}$ que pertenece a comportamiento de lluvia fuerte.

En la Figura 3 se encuentra el flujo-grama que seguirá esta investigación en la parte de acumulación de lluvia y de radar, paso a paso lo que se realiza y resultados esperados.

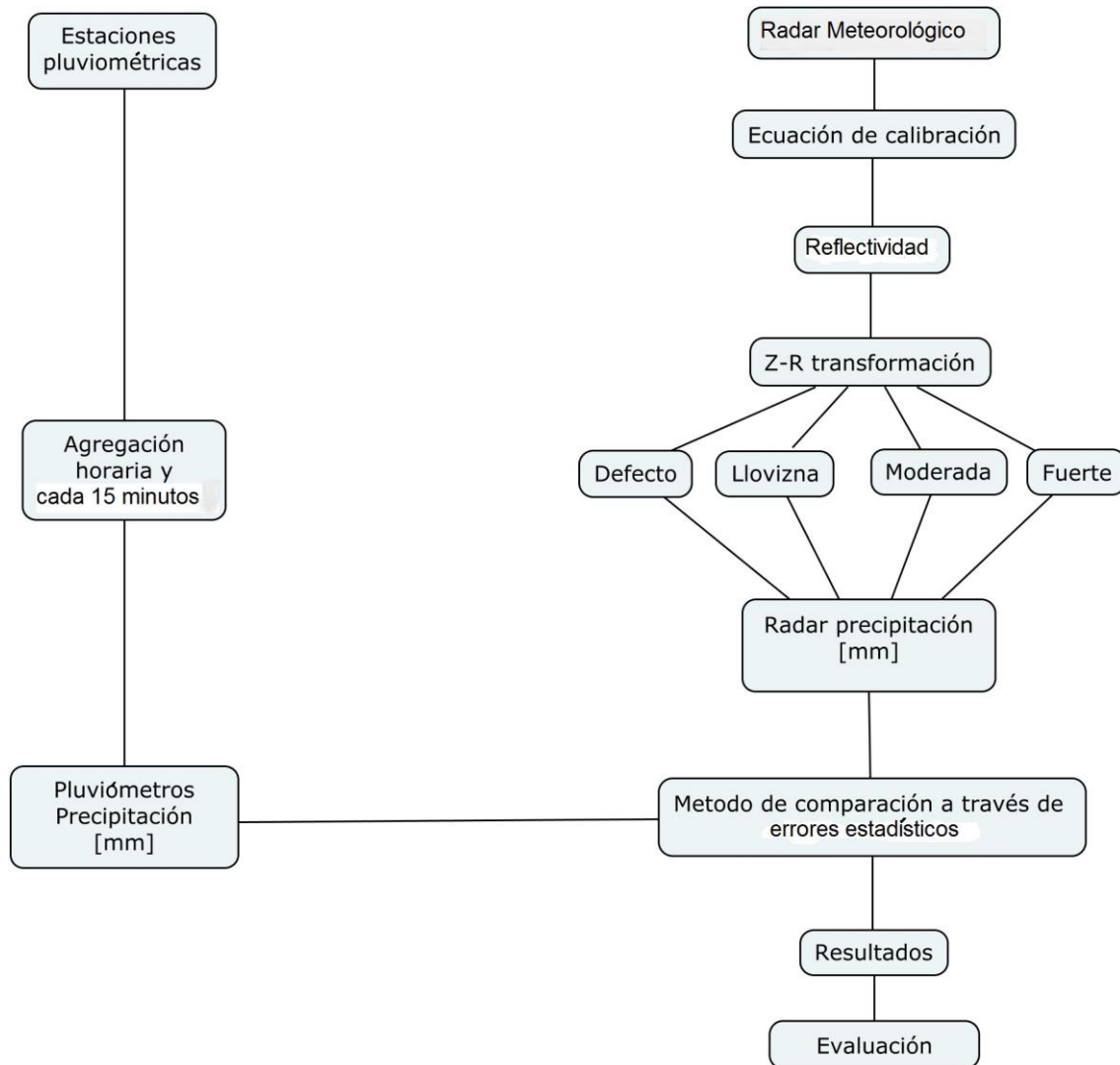


Figura 3. Flujo-grama del algoritmo de precipitación.

3.3.2. Estadísticos de bondad de ajuste

Las medidas de Abs-Bias, raíz del error medio cuadrado y coeficiente de determinación serán utilizadas para cotejar las estimaciones del radar con las de los pluviómetros.

- Abs-Bias: Evalúa la diferencia promedio en valor absoluto entre la precipitación estimada por el radar meteorológico (Pm) y la estimada por los pluviómetros (Pp), siendo n el número de observaciones, siendo perfecto cuando lo estimado por el radar es igual a la medición de los pluviómetros, que en este caso sería cuando el abs-bias es igual a cero.

$$Absbias = \sum_{i=1}^n \frac{|Pm_{xi} - Pp_{xi}|}{n}$$

Dónde:

Pm_{xi} = Precipitación registrada por el radar meteorológico.

Pp_{xi} = Precipitación registrada por los pluviómetros.

n = Número de datos

- Raíz del error medio al cuadrado: RMSE (por sus siglas en inglés “*rootmean square error*”) evalúa el error de las estimaciones del radar meteorológico en comparación con las de los pluviómetros con un énfasis en valores extremos, siendo perfecto cuando lo estimado por el radar es igual a la medición de los pluviómetros, que en este caso sería cuando el RMSE es igual a cero

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Pm_{xi} - Pp_{xi})^2}$$

Dónde:

Pm_{xi} = Precipitación registrada por el radar meteorológico.

Pp_{xi} = Precipitación registrada por los pluviómetros.

n = Número de datos

- Coeficiente de determinación (R^2): Mide el nivel de concordancia entre las estimaciones del radar meteorológico y los pluviómetros esta entre valores de 0 a 1 con un valor perfecto de 1.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (P_p - \widetilde{P}_p) (P_m - \widetilde{P}_m)}{\sum_{i=1}^N (P_p - \widetilde{P}_p)^{0.5} (P_m - \widetilde{P}_m)^{0.5}} \right\}^2$$

Dónde:

P_p = Precipitación observada por los pluviómetros.

\widetilde{P}_p = Precipitación media observada por los pluviómetros

P_m = Precipitación observada por el radar meteorológico.

\widetilde{P}_m = Precipitación media observada por el radar meteorológico

n = Número de datos



4. Resultados y discusión

4.1. Agregaciones horarias y cada 15 minutos.

4.1.1. Pre-procesamiento de datos

La calidad de los datos de las 25 estaciones pluviográficas utilizadas en este estudio fueron previamente revisadas por las instituciones encargadas de las mismas. En este sentido, para el estudio se contó con 25 estaciones, correspondientes a 13 estaciones pluviométricas pertenecientes a IDHRICA y 12 estaciones pertenecientes a la empresa ETAPA EP.

4.1.2. Cálculo de precipitación horaria y cada 15 minutos

Mediante el programa Microsoft Excel 2010® se determinó la precipitación horaria y cada 15 minutos de los registros de los pluviógrafos. Para el caso de las imágenes de radar, el cálculo de transformación a escala horaria y cada 15 minutos requiere un procesamiento previo de conversión a tasa de lluvia en [mm/h] a partir de la variable reflectividad (Z). Esta transformación se realiza a través de una ley de potencia, también conocida como relación Z-R. Luego de tener este resultado, la lluvia horaria en [mm/h] se dividió para 12 con el objetivo de obtener la lluvia cada 5 minutos en [mm] para poder cotejar con las imágenes del radar que también están en [mm]. Por otro lado el procesamiento de las imágenes se realizó en el programa R (ver en el código en el anexo 1), A continuación se presenta un ejemplo comparativo visual entre las dos agregaciones de las imágenes del radar. Las agregaciones fueron realizadas para la fecha 02-05-2015 a las 21:15:00 (Figura 6) y para la fecha 02-05-2015 a las 21:00:00 hasta las 22:00:00 (Figura 7). Esta transformación permitió homologar la unidad de medición de ambos sensores: pluviómetros y radar meteorológico y así realizar la evaluación puntual. Es decir, las series de datos de precipitación registrada por los pluviómetros en cada estación se compararon con las estimaciones del radar en las grillas correspondientes a las estaciones.

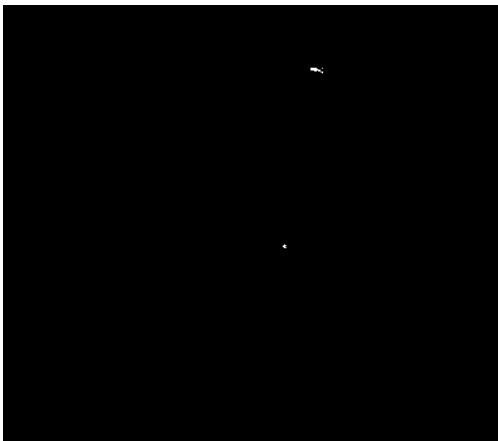


Figura 6. Imagen del radar acumulado
15 minutos. Fecha 02-05-2015_21-15
Tasa de lluvia = 0.0720568mm

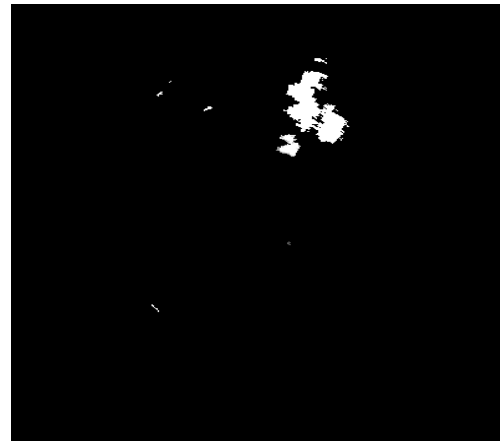


Figura 7. Imagen del radar acumulado
1hora. Fecha 02-05-2015_21:00 a 22:00
Tasa de lluvia = 0.320022mm

4.1. Análisis de los estadísticos de bondad de ajuste.

El bias absoluto, raíz del error medio cuadrado (RMSE) y coeficiente de determinación (R^2) dan una idea de la precisión del radar meteorológico en forma cuantitativa. A continuación se detalla los resultados más relevantes.

Las tablas 3, 4 y 5 muestran los mínimos, promedios y máximos valores de los tres estadísticos de bondad de ajuste para los cuatro modelos de relaciones Z-R, para las dos agregaciones temporales (acumulación de precipitación horaria y cada 15 minutos) y para cada alcance del radar 20km, 60km y 100km (resoluciones de las imágenes con un tamaño de pixel de 100m, 250m y 500m, respectivamente). Los pluviómetros utilizados para los estadísticos de bondad de ajuste en el alcance de 20km son 11 para el caso del alcance de 60km y 100km se utilizaron 25 pluviómetros, para los gráficos presentados posteriormente se utilizaron los valores puntuales de cada estación pluviométrica con respecto a los valores de cada grilla del radar meteorológico, se tomó el alcancé de 60km como referencia de las tres resoluciones debido a que la resolución de 20km y 100km son similares.



Tabla 3. Promedio del Abs-Bias de 1 hora y 15 min, para las cuatro ecuaciones del radar a las tres resoluciones 20km, 60km y 100km.

| ABS-BIAS (mm) | 20km | | | | | | 60km | | | | | | 100km | | | | | |
|---|------------|-------|-------|--------|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 15 minutos | | | 1 hora | | | 15 minutos | | | 1 hora | | | 15 minutos | | | 1 hora | | |
| | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max |
| Ecuación de defecto ($Z=200 R^{(1.6)}$) | 0 | 0.144 | 0.26 | 0 | 0.569 | 1.023 | 0 | 0.118 | 0.272 | 0 | 0.503 | 1.123 | 0 | 0.117 | 0.272 | 0 | 0.501 | 1.124 |
| Ecuación de llovizna ($Z=44.44 R^{(0.96)}$) | 0 | 0.158 | 0.26 | 0 | 0.68 | 1.083 | 0 | 0.16 | 0.29 | 0 | 0.739 | 1.564 | 0 | 0.165 | 0.381 | 0 | 0.758 | 1.566 |
| Ecuación de lluvia moderada ($Z=68.8 R^{(1.17)}$) | 0 | 0.134 | 0.237 | 0 | 0.576 | 1.021 | 0 | 0.121 | 0.271 | 0 | 0.56 | 1.189 | 0 | 0.122 | 0.271 | 0 | 0.558 | 1.198 |
| Ecuación de lluvia fuerte ($Z=235 R^{(1.2)}$) | 0 | 0.146 | 0.261 | 0 | 0.582 | 1.032 | 0 | 0.12 | 0.274 | 0 | 0.513 | 1.138 | 0 | 0.119 | 0.273 | 0 | 0.51 | 1.138 |



Tabla 4. Promedio de la raíz del error medio cuadrado (RMSE): de 1 hora y 15 min, para las cuatro ecuaciones del radar en las tres resoluciones 20km, 60km y 100km.

| RMSE (mm) | 20km | | | | | | 60km | | | | | | 100km | | | | | |
|---|------------|-------|-------|--------|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 15 minutos | | | 1 hora | | | 15 minutos | | | 1 hora | | | 15 minutos | | | 1 hora | | |
| | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max |
| Ecuación de defecto ($Z=200 R^{(1.6)}$) | 0 | 0.027 | 0.048 | 0 | 0.169 | 0.311 | 0 | 0.029 | 0.087 | 0 | 0.197 | 0.608 | 0 | 0.028 | 0.087 | 0 | 0.195 | 0.609 |
| Ecuación de llovizna ($Z=44.44 R^{(0.96)}$) | 0 | 0.047 | 0.19 | 0 | 0.264 | 0.747 | 0 | 0.058 | 0.22 | 0 | 0.365 | 0.858 | 0 | 0.061 | 0.237 | 0 | 0.375 | 0.926 |
| Ecuación de lluvia moderada ($Z=68.8 R^{(1.17)}$) | 0 | 0.027 | 0.057 | 0 | 0.177 | 0.308 | 0 | 0.032 | 0.078 | 0 | 0.229 | 0.61 | 0 | 0.032 | 0.078 | 0 | 0.229 | 0.614 |
| Ecuación de lluvia fuerte ($Z=235 R^{(1.2)}$) | 0 | 0.028 | 0.048 | 0 | 0.172 | 0.315 | 0 | 0.029 | 0.085 | 0 | 0.2 | 0.611 | 0 | 0.085 | 0.029 | 0 | 0.199 | 0.612 |



Tabla 5. Promedio del Coeficiente de determinación (R^2) de 1 hora y 15 min, para las cuatro ecuaciones del radar en las tres resoluciones 20km, 60km y 100km.

| R ² | 20km | | | | | | 60km | | | | | | 100km | | | | | |
|---|------------|-------|-------|--------|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 15 minutos | | | 1 hora | | | 15 minutos | | | 1 hora | | | 15 minutos | | | 1 hora | | |
| | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max | min | prom | max |
| Ecuación de defecto ($Z=200 R^{(1.6)}$) | 0.028 | 0.42 | 0.755 | 0 | 0.073 | 0.149 | 0.001 | 0.286 | 0.831 | 0 | 0.051 | 0.152 | 0.001 | 0.275 | 0.895 | 0.002 | 0.063 | 0.308 |
| Ecuación de llovizna ($Z=44.44 R^{(0.96)}$) | 0 | 0.391 | 0.76 | 0.001 | 0.034 | 0.111 | 0 | 0.247 | 0.757 | 0.001 | 0.024 | 0.105 | 0 | 0.231 | 0.808 | 0.001 | 0.035 | 0.237 |
| Ecuación de lluvia moderada ($Z=68.8 R^{(1.17)}$) | 0.002 | 0.407 | 0.764 | 0 | 0.045 | 0.127 | 0 | 0.263 | 0.77 | 0 | 0.032 | 0.119 | 0.001 | 0.249 | 0.854 | 0 | 0.043 | 0.257 |
| Ecuación de lluvia fuerte ($Z=235 R^{(1.2)}$) | 0.003 | 0.408 | 0.764 | 0 | 0.046 | 0.129 | 0.001 | 0.266 | 0.776 | 0 | 0.033 | 0.12 | 0.001 | 0.252 | 0.859 | 0 | 0.044 | 0.26 |

4.1.1. Análisis de los estadísticos de bondad de ajuste de acuerdo a las agregaciones temporales de 15 minutos y 1 hora.

Las figura 8, 9 y 10 muestran los resultados de los cálculos de los tres estadísticos para una resolución de 250 metros (alcance del radar de 60km).

En general, se observa en la Figura 8 que para la agregación de 15 min los errores calculados son menores que la agregación de una hora. Se aprecia que en la agregación de 15 minutos que el bias absoluto es bajo (≤ 0.4 mm) para todas las estaciones pluviométricas que se usaron en este estudio dentro de la resolución de 250 metros. Por otro lado en la agregación de una hora se observa valores más elevados llegando hasta (1.6 mm) en la misma resolución de 250 metros. En la Figura 9 se puede observar que el error RMSE en la agregación de 15 minutos es bajo (≤ 0.3 mm) para todas las estaciones pluviométricas para la resolución de 250 metros; en cambio para la agregación de una hora se observa valores más elevados cercanos a (1 mm). En cuanto al coeficiente de determinación (R^2) en la figura 10 se observa que en la agregación de 15 minutos los valores están en un promedio de 0.43 para la resolución de 250 metros. Por lo contrario en la agregación de una hora se observa valores bajos con un promedio de 0.12 en la misma resolución

Se tomó la resolución de 250 metros como referencia de las tres resoluciones debido a que la resolución de 100 y 500 metros son similares (Anexo 4). No obstante, en las Tablas 3, 4 y 5 se muestra detalladamente los promedios de los tres estadísticos para cada una de las cuatro ecuaciones en las dos agregaciones temporales y para las tres resoluciones del radar 100, 250 y 500 metros (alcance de 20km, 60km y 100km, respectivamente).

Una particularidad que se observa en las figuras 8, 9 y 10 es que cuando no existe precipitación los valores captados por el radar y los pluviómetros se igualan. Por lo tanto los estadísticos alcanzan sus valores perfectos (es decir, los el Abs-Bias y el RMSE son iguales a 0 y el R^2 es igual a 1) y son los mismos para las cuatro

ecuaciones del radar para las dos agregaciones (15 min y 1 hora) y para las tres resoluciones del radar 100, 250 y 500 metros (anexo 4).

En resumen, con los resultados de las Tablas 3, 4 y 5 y las Figuras 8, 9 y 10 se observa que el bias absoluto y la raíz del error medio cuadrado (RMSE) son menores en la agregación de 15 min y en cuanto al coeficiente de determinación (R^2) los valores son mayores en la agregación de 15 min. Por el contrario, a mayor agregación temporal mayor son los errores y el coeficiente de determinación (R^2) disminuye. Esto se debe a que existe una acumulación de error cada 5 minutos y por lo tanto los estadísticos empeoran casi linealmente cuando las agregaciones temporales aumentan.

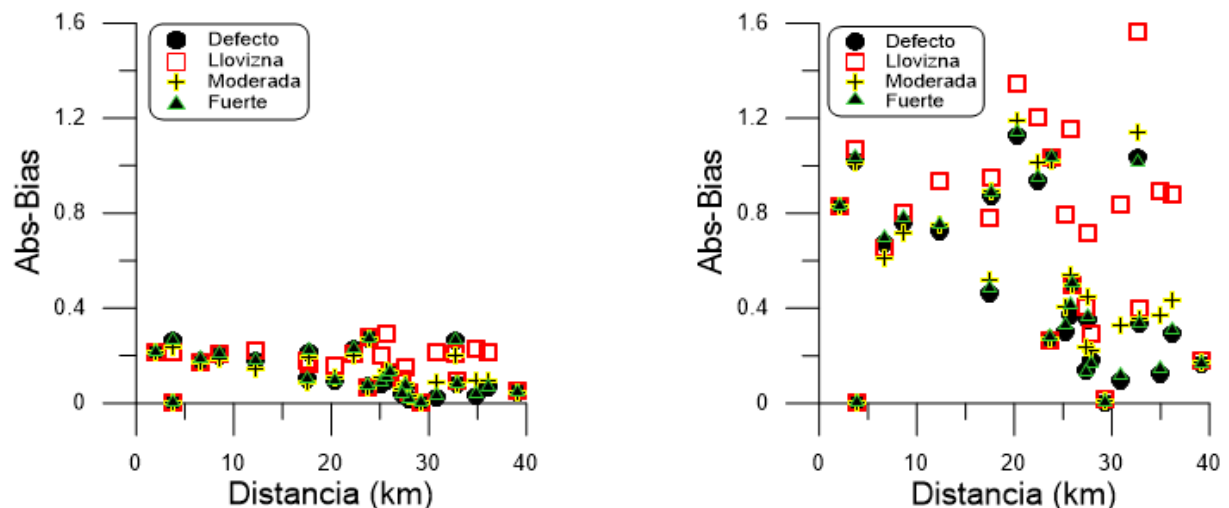


Figura 8 Abs-Bias respecto a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde). A la izquierda la agregación de 15 min y a la derecha la agregación de una hora.

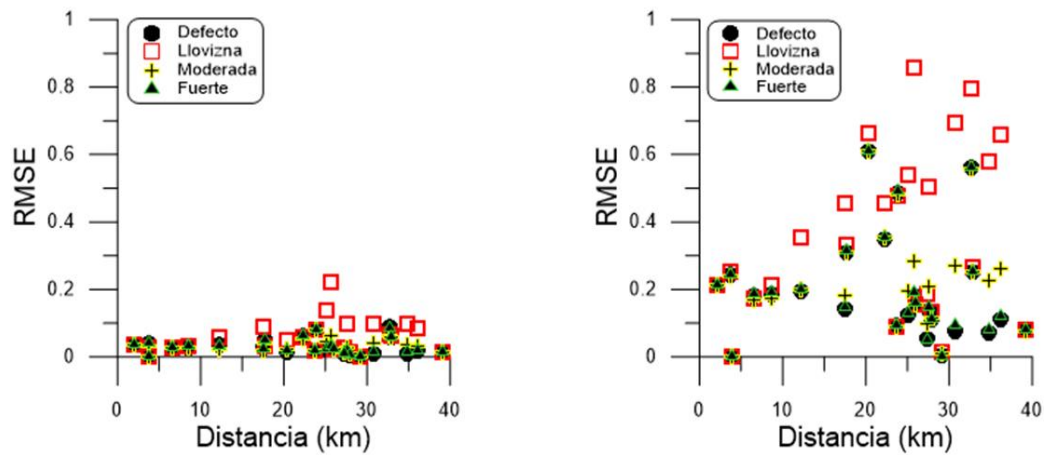


Figura 9: Raíz del error medio al cuadrado (RMSE) respecto a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde). A la izquierda la agregación de 15 min y a la derecha la agregación de una hora. Datos para la resolución de 250 metros.

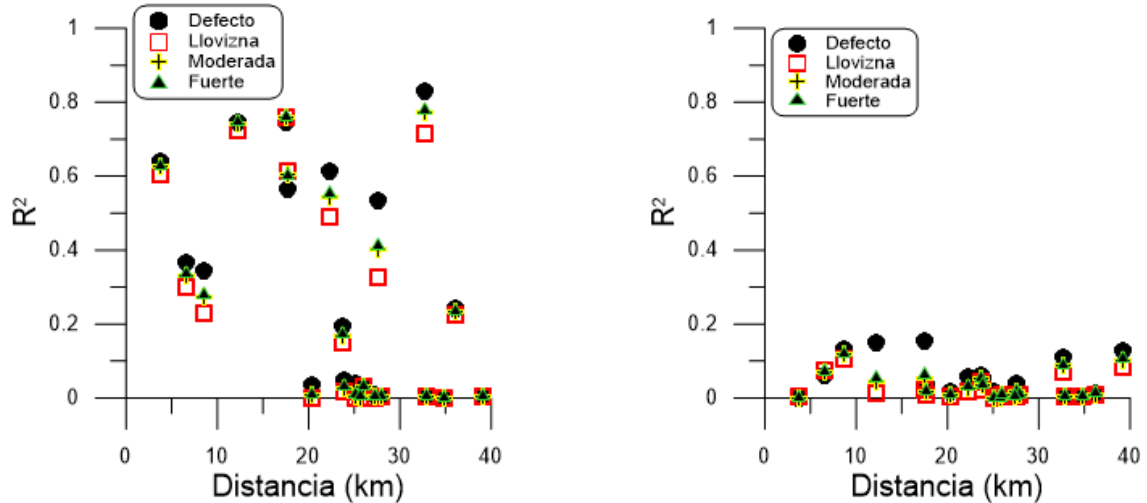


Figura 10: Coeficiente de determinación R^2 respecto a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde). A la izquierda la agregación de 15 min y a la derecha la agregación de una hora. Datos para la resolución de 250 metros.

4.1.2. Tendencia de ajuste de las cuatro ecuaciones del radar meteorológico con respecto a cada estación pluviométrica.

Las Figuras 11 y 12 muestran que existen valores más altos del Abs-Bias y el RMSE para las estaciones más cercanas al radar (0 a 10km) y para las ecuaciones del radar: defecto, lluvia fuerte y moderada. Una explicación de esta situación es porque el radar está ubicado en el páramo a una altura de 4450 m.s.n.m. donde la llovizna es mucho más común (Padrón Flasher, 2013), por lo tanto los otros tipos de precipitación tienen más errores; sin embargo cuando la ubicación de las estaciones pluviométricas se alejan del radar, los errores de las ecuaciones por defecto, moderada y fuerte, disminuyen hasta llegar a la ciudad de Cuenca (30km), donde el tipo de precipitación que predomina son eventos relativamente fuertes (Sucozhañay, 2015). Este análisis se puede observar mejor con el abs-bias (Figura 11). En cambio la llovizna (rojo) muestra errores más altos en la ciudad de Cuenca y cuando se acerca al radar los errores disminuyen. Esto se puede observar mejor con el RMSE (Figura 12). Para el caso del coeficiente de determinación (R^2), la Figura 13 muestra que existe un patrón donde la ecuación de defecto (negro) se ajusta mejor en todo el rango de distancia, seguidos por la ecuación de lluvia fuerte (verde), después la ecuación de lluvia moderada (amarillo) y por último la ecuación de llovizna (rojo); esta última tiene los menores valores en la mayoría de estaciones pluviométricas.

Recapitulando, con los resultados de las Tablas 3, 4 y 5; y las Figuras 11, 12 y 13 se observa que la ecuación de defecto (negro), fuerte (verde) y moderada (amarillo) para el bias absoluto y la raíz del error medio cuadrado (RMSE) tienen mayores errores cuando las estaciones pluviométricas están cerca del radar, mientras que la ecuación de llovizna (rojo) tiene un comportamiento contrario. Para el caso del coeficiente de determinación (R^2) muestra que la ecuación defecto (negro) tiene un mejor R^2 en la mayoría de las estaciones y la ecuación de llovizna (rojo) tiene valores bajos de R^2 en la mayoría de estaciones.

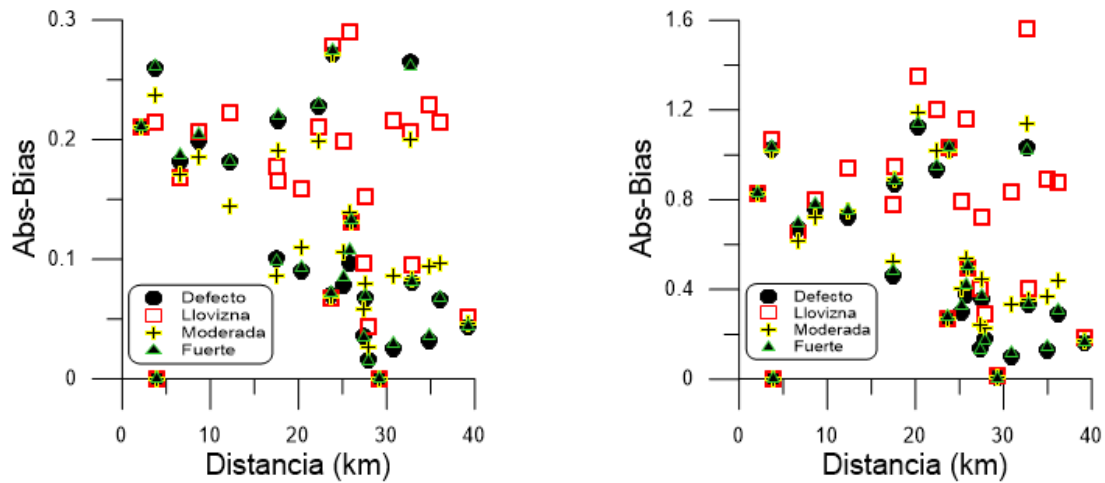


Figura 11: Abs-Bias respecto a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde). A la izquierda la agregación de 15 min y a la derecha la agregación de una hora. Datos para la resolución de 250 metros.

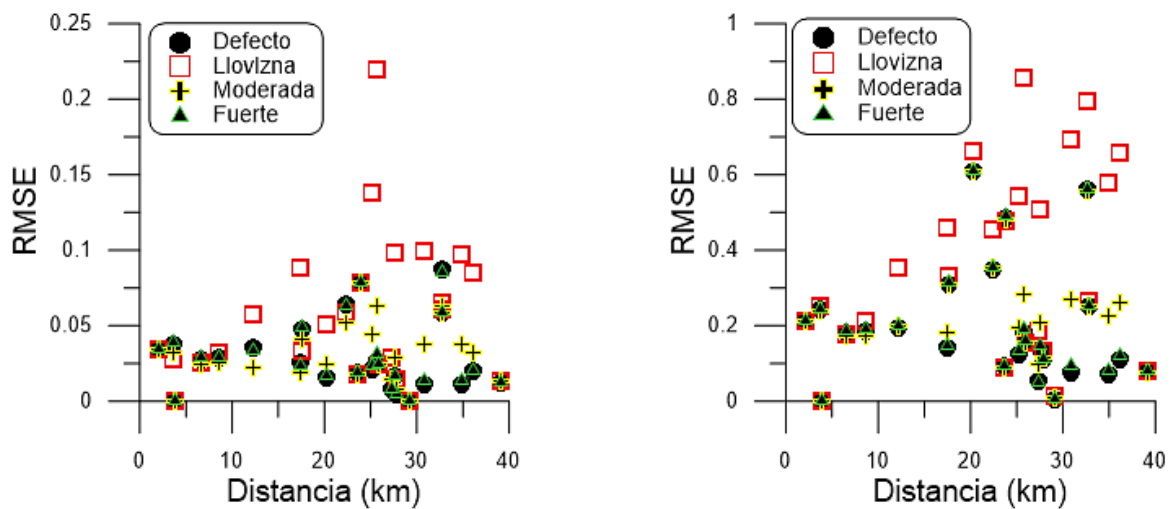


Figura 12: Raíz del error medio al cuadrado (RMSE) respecto a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde). A la izquierda la agregación de 15 min y a la derecha la agregación de una hora. Datos para la resolución de 250 metros.

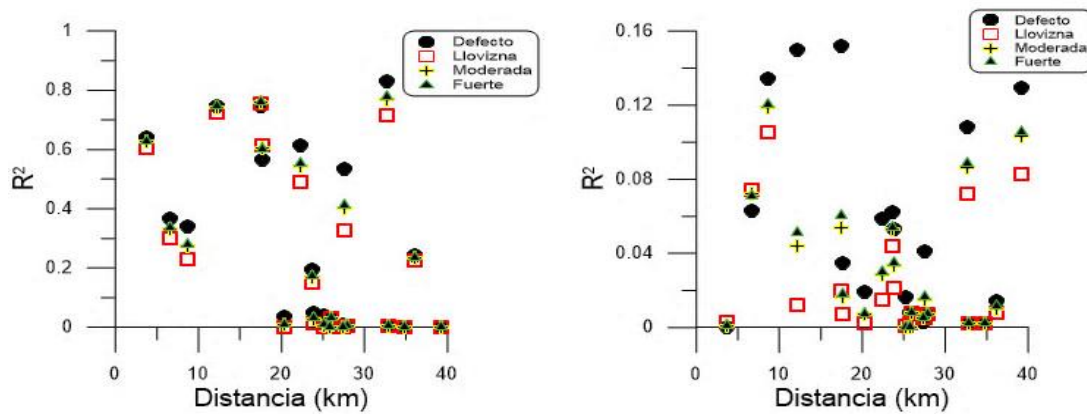


Figura 13: Coeficiente de determinación R^2 respecto a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde). A la izquierda la agregación de 15min y a la derecha la agregación de una hora. Datos para la resolución de 250 metro

4.1.3. Evaluación de las resoluciones del tamaño de pixel que corresponden a 100m, 250m y 500m para los tres estadísticos de bondad de ajuste

De acuerdo al alcance de la señal del radar: 20Km, 60Km y 100Km de radio, las resoluciones de tamaño de pixel corresponden a 100m, 250m y 500m respectivamente. La Figura 14 muestra los estadísticos de bondad de ajuste respecto a la distancia al radar para las ecuaciones del radar defecto, llovizna, moderada, y fuerte, de la agregación de 15 min y para las diferentes resoluciones (100, 250 y 500metros).

En general los estadísticos de bondad de ajuste se mantienen en el mismo valor para las tres resoluciones propuestas en este estudio (Figura 14). Esta similitud se verificó mediante un test estadístico (anexo 3). Estos resultados nos indican que no se observa una diferencia notoria entre el tamaño de pixel más pequeño (100x100) con el pixel más grande (500x500).



En resumen, con los resultados de las Tablas 3, 4 y 5; y la figura 14, se observa que no existe una relación de mejora de los errores calculados frente a la relación del tamaño del pixel.

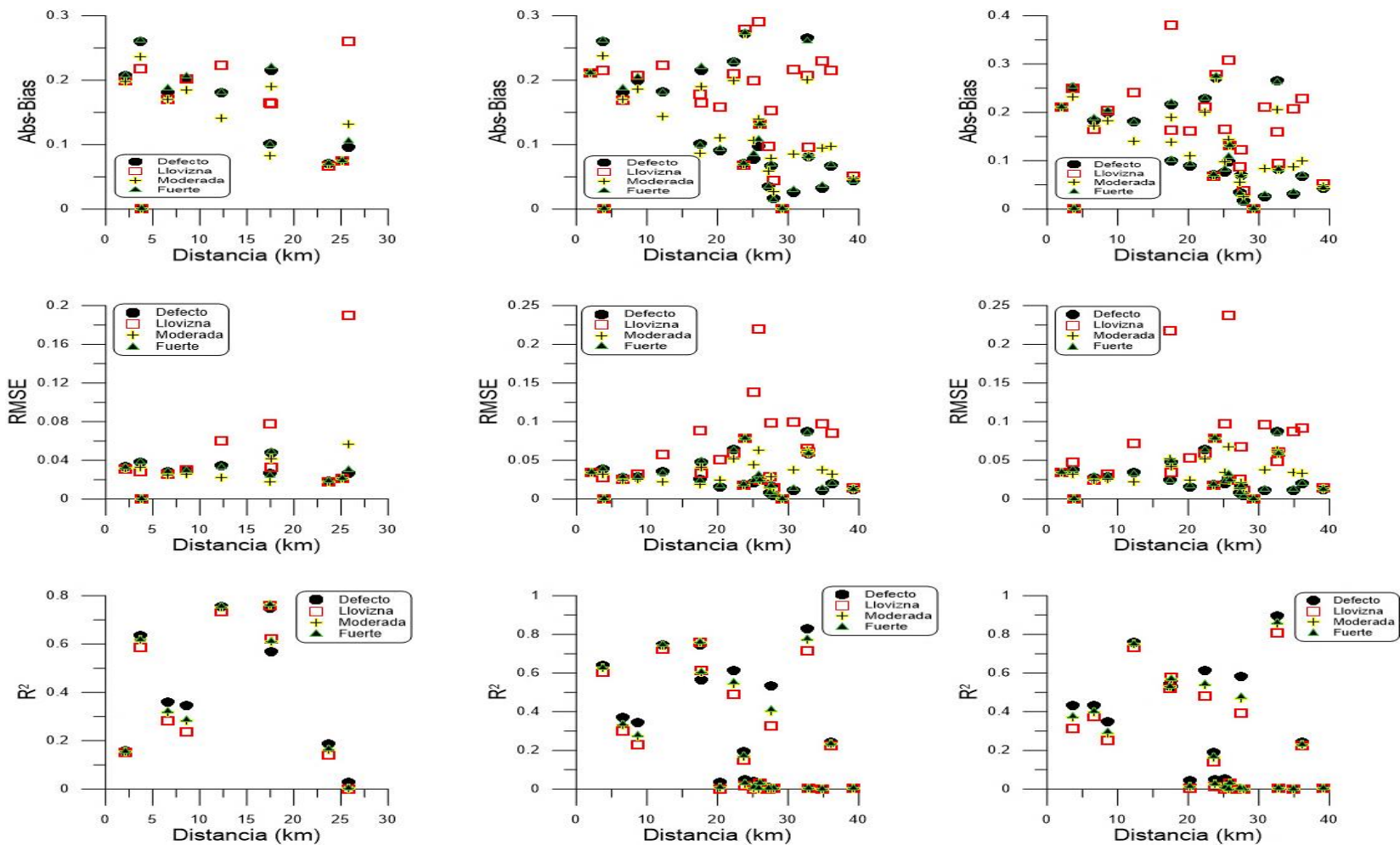


Figura 14: *bias absoluto, raíz del error medio cuadrado (RMSE) y coeficiente de determinación (R^2) respecto a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde). A la agregación de 15 min, de izquierda a derecha 100, 250 y 500 metros respectivamente.*



5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Este estudio tuvo por objeto evaluar la precipitación estimada de un radar meteorológico con datos observados en sensores pluviométricos a partir de cuatro modelos de relaciones Z-R, con dos agregaciones temporales (horaria y cada 15 minutos), y con tres diferentes resoluciones espaciales (100, 250 y 500 metros).

El estudio se realizó con 25 estaciones pluviométricas, correspondientes a trece estaciones pluviométricas pertenecientes al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca y doce estaciones pertenecientes a la empresa ETAPA EP, ubicados en la ciudad de Cuenca y el Parque Nacional Cajas. Se obtuvieron las estimaciones de precipitación de las grillas del radar meteorológico CAXX en donde se ubican las estaciones pluviométricas y se calcularon estadísticos de bondad de ajuste: bias absoluto, raíz del error medio cuadrado (RMSE) y coeficiente de determinación (R^2), para comparar con los datos estimados del radar con los valores de precipitación de las estaciones pluviométricas, cuyos resultados nos indican la precisión del radar meteorológico en forma cuantitativa.

Como se esperaba la agregación de 15 minutos mostro errores menores en cuanto al abs-bias y raíz del error medio cuadrado (RMSE) frente a la agregación de 1 hora cuyos valores fueron más altos. Además el coeficiente de determinación (R^2) mostro que a la agregación de 15 minutos tiene una mejor correlación que la agregación de 1 hora. Por lo tanto, se puede concluir que cuanto mayor sea la agregación temporal, mayor serán los errores y menor correlación tendrán los valores estimados por el radar y los valores de las estaciones pluviométricas.

Por otro parte, se pudo determinar cuál de las diferentes ecuaciones del radar defecto, llovizna, moderada, y fuerte se ajusta mejor dependiendo de la proximidad al radar en cada una de las estaciones pluviométricas, siendo la



ecuación de llovizna la que se ajusta mejor en distancias menores a 10km, y las demás ecuaciones (defecto, fuerte y moderada), se ajustan mejor a distancias mayores a 10km hasta los 40km, siendo la ecuación de lluvia fuerte la que se ajusta mejor en la ciudad de Cuenca.

Además, se comprobó que no existe una relación de mejoras en los estadísticos de ajuste calculados frente a la relación del tamaño del pixel (100, 250 y 500 metros).

Finalmente indicar que estos resultados son una evaluación primaria de las imágenes del radar meteorológico CAXX para la estimación de la precipitación, lo cual da un inicio para el entendimiento del comportamiento tanto espacial como temporal de la precipitación dentro del área de estudio, especialmente de la ciudad de Cuenca.

5.2 Recomendaciones

Usar este estudio como base para la toma de decisiones acerca de la evaluación de las imágenes del radar meteorológico CAXX, y considerar que se puede seguir una línea de investigación más amplia en este ámbito.

Los parámetros de la ecuación fuerte se podrían utilizar para futuros estudios dentro de la ciudad de Cuenca, por lo contrario en los ecosistemas de paramos los parámetros de la ecuación de llovizna podrían ser una mejor opción.

Este estudio se realizó con los estadísticos de bondad de ajuste frente a la distancia al radar, por lo cual se recomienda que en un próximo estudio se realice frente a la altura al radar.

Teniendo la evaluación primaria de las imágenes del radar meteorológico CAXX, se recomienda hacer un estudio más allá realizando estudios futuros de calibraciones de radares.



6. Referencias

- Castro Loayza, E. S. (2014). Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador. Recuperado a partir de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20874>
- García, C. L. (2014, DIC). Utilización de información satelital y modelación hidrológica distribuida para el manejo integrado de recurso hídricos. Universidad Católica de Córdoba. Recuperado a partir de <http://www.corciencia.org.ar/id/eprint/5213>
- Goodrich, D. C., Faures, J. M., David A. Woolhiser, Lane, L. J., & Soroosh Sorooshian. (1995). Measurement and analysis of small scale convective storm rainfall variability.
- Joss, J., Waldvogel, A., & Zawadzki, I. (1997). Raindrop size distribution again. In Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology, Austin, TX, Amer. Meteor. Soc (pp. 326-327).
- Donoso, E. (2002). La Cuenca del río Paute: diagnóstico y propuesta de manejo integral, políticas de desarrollo agropecuario.
- Krajewski, W. F., & Ciach, G. J. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques*, 48(April), 151-162.
- Maderey Rascón, L. E. (2005). Principios de hidrogeografía: estudio del ciclo hidrológico. Universidad Nacional Autónoma de México, NUM 1.
- Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of meteorology*, 5(4), 165-166



- Nieto, J. J. (2007). Modelo de regresión lineal múltiple para determinar influencias del índice niño 1+2 y la mjo sobre las precipitaciones en guayaquil durante enero-febrero-marzo y abril. Acta oceanográfica del pacífico N° 1, 14.
- Núñez, M. (1996). Una crítica a la medida de la precipitación. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/20.500.11765/2453>
- Organización Meteorológica Mundial. (1993). Atlas internacional de nubes. 1, Manual de observación de nubes y otros meteoros 1, Manual de observación de nubes y otros meteoros. Ginebra (Suiza): Organización Meteorológica Mundial.
- Padrón Flasher, R. S. (2013). Análisis de la estructura de la lluvia del páramo. Universidad de cuenca. Recuperado a partir de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/519>
- Pellejeo Ibáñez, I. (21/09/2009). Radares Metereologicos.
- Reinoso, P. L. G. (2015). Imputación de Datos en Series de Precipitación Diaria Caso de Estudio Cuenca del Río Quindío. Ingeniare, (18), 73-86.
- Reyes Coca, S. (2001). Introducción a la meteorología. Mexicali, Mexico : Universidad Autónoma de Baja California.
- Scheel, M. L. M., Rohrer, M., Hugel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., & Huffman, G. J. (2011). Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. Hydrology and Earth System Sciences, 15(8), 2649-2663. <http://doi.org/10.5194/hess-15-2649-2011>
- Sucozhañay, A. (2015). Análisis de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en la ciudad de cuenca durante el período febrero – julio de 2014.
- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata



Basin. Journal of Hydrometeorology, 9(4), 622-640.

<http://doi.org/10.1175/2007JHM944.1>

Zawadzki, I. (1984). Factors affecting the precision of radar measurements of rain. In Conference on Radar Meteorology, 22 nd, Zurich, Switzerland (pp. 251-256).



7. Anexos

Anexo 1. Algoritmo en R para extraer las estimaciones del radar meteorológico en la grilla correspondiente a cada estación.

```
#Descargar e instalar los paquetes necesarios
library(raster)
library(sp)
library(dplyr)
library(rtiff)
library(pixmap)
library(rgdal)
library(doMC)
library(doSNOW)
library(stringr)
library(foreach)
library(doParallel)
library(gdata)
```

Parte 1: IMAGENES

Pasos generales

2- Corregir imágenes para transformar de reflectividad a lluvia (mm)

3- Agregar precipitación diaria

Productos de salida:

1- TIFF multilayer por día de imágenes horarias p.ejemplo: 2015-03-26.tif

2- TIFF con precipitación diaria (agregado) p. ejemplo: 2015-03-26_sum.tif

3- archivo de texto con fechas y horas contenidas en TIFF multilayer p.
ejemplo: 2015-03-26.csv

Calculate by dividing process to hour and day
start_task <- Sys.time()

a and b parameters from Z-R relation defecto

a <- 200

b <- 1.6

a and b parameters from Z-R relation moderada

a <- 68.8

b <- 1.17

a and b parameters from Z-R relation llovizna

a <- 44.44

b <- 0.96

a and b parameters from Z-R relation fuerte



```
a <- 235
```

```
b <- 1.2
```

```
dirTiffsDia = "C:/r_resultados_fuerte/resultados/tiffsDia"
```

```
dirTiffsHora = "C:/r_resultados_fuerte/resultados/tiffsHora"
```

```
dirTiffsConjuntoDia = paste(dirTiffsDia, "/conjunto", sep="")
```

```
dirTiffsConjuntoHora = paste(dirTiffsHora, "/conjunto", sep="")
```

```
dirShp = "C:/r_resultados_fuerte/resultados/shp"
```

```
dirsDatosRadar = c(c(),
```

```
  "C:/r_resultados_fuerte/imagenesValidadas/100kmCaxx.ppi",
```

```
  "C:/r_resultados_fuerte/imagenesValidadas/60kmCaxx.ppi",
```

```
  "C:/r_resultados_fuerte/imagenesValidadas/20kmCaxx.ppi",
```

```
  c())
```

```
dirDatosRadar = "~/tesis_primera/Ejemplo_tesis_pregrado/100Km"
```

```
start_task <- Sys.time()
```

```
n.cores=detectCores()
```

```
cl<-makeCluster(n.cores)
```

```
registerDoParallel(cl)
```

```
registerDoMC(cores=n.cores)
```

```
cluster<-makeCluster(n.cores) #<- # of processors / hyperthreads on machine
```

```
registerDoParallel(cluster)
```

```
registerDoSNOW(cluster)
```

```
#procesa todos los directorios de imágenes de radar para obtener sus valores  
de acuerdo a los puntos de cada estacion, tanto de idrhica como de etapa
```

```
proc=foreach (dir = dirsDatosRadar) %dopar% {
```

```
#for (dir in dirsDatosRadar) {
```

```
  library(raster)
```

```
  procesarImagDir(dir)
```

```
  dir
```

```
}
```

```
stopCluster(cluster)
```

```
end_task <- Sys.time () - start_task
```

```
end_task
```

```
#Procesa un directorio que contendrá carpetas indicando la fecha y cada una  
contendrá imágenes tif de radar
```

```
# Calcula la lluvia acumulada horaria y diaria
```

```
# Genera los tiffs multi-layer con todos los raster que se incluyeron para  
calcular la lluvia acumulada
```

```
procesarImagDir <- function(dirlmgRadarPorFecha) {
```

```
  #obtener el nombre de la última carpeta de la ruta que se va a procesar.
```



#Ej: de c:/ruta/imagenes/100Km obtendrÃ¡ "100Km" y servirÃ¡ para almacenar las imÃ¡genes acumuladas en la carpeta "100Km" pero dentro de otra carpeta llamada "resultados"

```
strTamanio = basename(dirlmgRadarPorFecha)
```

#listar todos los directorios a procesar. Por lo general son las fechas

#Ej: si dirlmgRadarPorFecha = c:/ruta/imagenes/100Km, entonces directorios valdrÃ¡ a c:/ruta/imagenes/100Km/11-05-2015, c:/ruta/imagenes/100Km/12-05-2015 (suponiendo que ambas son carpetas dentro de c:/ruta/imagenes/100Km)

```
directorios <- list.dirs(path = dirlmgRadarPorFecha, recursive = FALSE, full.names = TRUE) # lee los directorios donde se almacenan las imÃ¡genes (los directorios son fechas)
```

```
listaArchivosTif = NULL #se almacenara toda la lista de archivos en el directorio procesado
```

```
listaFechasArchivos = NULL #almacenara las fechas a la que corresponde el archivo del directorio procesado
```

```
for (i in 1:length(directorios)) { #por cada directorio
```

```
files <- list.files(path=directorios[i], pattern='.tif', full.names = TRUE) # obtener una lista de todos los archivos tif que esten en el directorio
```

```
for (j in 1:length(files)) { #por cada archivo tif en el directorio  
listaArchivosTif = c(listaArchivosTif, files[j]) #aÃ±adirlo a la lista de archivos  
tif
```

```
fileName = basename(files[j]) #obtener solo el nombre del archivo  
strOnlyDate = substr(fileName, 1, 12) #extraer del nombre del archivo solo el texto que indica la fecha
```

```
fecha = as.POSIXct(strptime(strOnlyDate, "%Y%m%d%H%M"), tz = "GMT")  
#transformar el texto a fecha, indicando que se trata de zona horaria GMT  
attr(fecha, "tzone") <- "America/Guayaquil" #transformar la zona horaria a la de Ecuador (puesto que los datos originales estÃ¡n en zona horaria GMT)
```

```
#agregar la fecha a la lista de fechas  
if (is.null(listaFechasArchivos)) {  
listaFechasArchivos = fecha  
} else {  
listaFechasArchivos = c(listaFechasArchivos, fecha)  
}  
}  
}  
#crear un data frame que contenga la lista de archivos y la fecha a la que pertenecen, ademÃ¡s guardar espacio para almacenar los ids de hora (hourGroup) y dia (dayGroup)  
dfDataFiles = data.frame(file=listaArchivosTif, date = listaFechasArchivos, hourGroup = -1, dayGroup = -1)  
dfDataFiles=dfDataFiles[complete.cases(dfDataFiles),]  
dfDataFiles = dfDataFiles[order(dfDataFiles$date),] #sort by date, ascending
```



```
#generar los ids para cada fila
dfDataFiles = generateDateGroupIds(dfDataFiles, "date")

columnOfId = "hourGroup"
destinationTif = paste(dirTiffsHora, "/", strTamanio, sep="")
destinationTifSet = paste(dirTiffsConjuntoHora, "/", strTamanio, sep="")
dir.create(destinationTif, showWarnings = FALSE)
dir.create(destinationTifSet, showWarnings = FALSE)
generateAcumAndSetTifs(dfDataFiles, columnOfId, destinationTif,
destinationTifSet)

columnOfId = "dayGroup"
destinationTif = paste(dirTiffsDia, "/", strTamanio, sep="")
destinationTifSet = paste(dirTiffsConjuntoDia, "/", strTamanio, sep="")
dir.create(destinationTif, showWarnings = FALSE)
dir.create(destinationTifSet, showWarnings = FALSE)
#generateAcumAndSetTifs(dfDataFiles, columnOfId, destinationTif,
destinationTifSet)
#!print(destinationTif)
#!print(destinationTifSet)
}

### Acumula los archivos raster de acuerdo al id de día u hora al que
pertenecan, además almacena los tifs acumulados en archivos, junto con los
tifs multi capa
# columnOfId = "dayGroup"
# destinationTif=paste(dirTiffsDia, "/", strTamanio, sep="")
# destinationTifSet=paste(dirTiffsConjuntoDia, "/", strTamanio, sep="")
generateAcumAndSetTifs <- function(dfDataFiles, columnOfId, destinationTif,
destinationTifSet) {
  ids = unique(dfDataFiles[, columnOfId]) #obtener todos los ids (dependiendo
del parametro de la funcion, pueden ser ids de hora o dia) disponibles en el
data frame
  #print(paste("ids",ids , "colid:", columnOfId, "destinationTif:", destinationTif,
"rows:",nrow(dfDataFiles)))
  #print(head(dfDataFiles))
  for (currId in ids) { #recorrer todo los ids
    pos <- which(dfDataFiles[,columnOfId] == currId) #obtener las posiciones de
las filas que tengan el mismo id que corresponde

    accum <- NULL
    datesIncluded <- NULL
    filesIncluded <- NULL
    for (i in pos) { #recorrer todas las posiciones
      currRow = dfDataFiles[i,] #obtener todos los datos de la fila en cierta
posicion
      image <- raster(paste(currRow$file)) #leer el archivo que corresponde de la
fila (la columna "file" siempre ha contenido la ruta del archivo)
```



```
### Transformar dbZ a Z /  $Z = 10^{(dbZ/10)}$  -> Donde dbZ es el
valor/unidad original de la imagen de radar
image <- 10^(image/10)
### Apply Z-R relation using a and b parameters
image <- (image/a)^(1/b)
image <- image/12
#####

if (is.null(datesIncluded)) {
  accum <- image
  datesIncluded <- (date=currRow$date)
  filesIncluded <- as.character(currRow$file)
} else {
  accum <- addLayer(accum,image)
  datesIncluded <- c(datesIncluded, (date=currRow$date)) #agregar nuevas
capas para generar el tif multi capa
  filesIncluded <- c(filesIncluded, as.character(currRow$file))
}
}
R <- brick(accum) #multi capa

# realizar la suma de acuerdo a todos los raster obtenidos
if (length(datesIncluded) > 1) {
  image_raster <- calc(R, na.rm=TRUE, fun=sum )
  #if (columnOfId != "hourGroup") {
  #image_raster <- image_raster !!!!!!!!!!!!!!! #ELIMINAR para 24
  #}
} else {
  image_raster <- R
}

## generar un nombre de archivo de acuerdo a los datos que se incluyen en
el mismo.
# Ej si el brick incluye datos de: 14/06/2015-19:55 y 14/06/2015-20:00, el
archivo se debe llamar 14-06-2015_hour19
# Si el brick solo incluyera el dato de 14/06/2015-20:00, el archivo igual se
debe llamar 14-06-2015_hour19
fileName = ""
firstDateIncluded = datesIncluded[1]
minutes = as.numeric(format(firstDateIncluded,"%M"))
hours = as.numeric(format(firstDateIncluded,"%H"))
if (columnOfId == "hourGroup") {
  if (minutes == 0) {
    firstDateIncluded = firstDateIncluded - 1*60*60
  }

  fileName = format(firstDateIncluded,"%d-%m-%Y_hour%H")
} else {
```



```
if (hours == 0 && minutes == 0) {
  firstDateIncluded = firstDateIncluded - 24*60*60
}
fileName = format(firstDateIncluded,"%d-%m-%Y")
}
## fin generar nombre de archivo

#guardar la imagen acumulada, el brick multi layer y un csv con las fechas
que de incluyeron para realizar los calculos de acumulacion
writeRaster(image_raster, filename=paste(destinationTif,"/",
fileName,"_sum",".tif", sep=""), format="GTiff", overwrite=TRUE)#
precipitaciones horarias agregadas
writeRaster(R, filename=paste(destinationTifSet,"/", fileName,".tif", sep=""),
format="GTiff", overwrite=TRUE)# TIFF multilayer con todas la imágenes para
el dia en cuestion
write.table(datesIncluded, file = paste(destinationTifSet,"/", fileName,".csv",
sep=""), sep = ",")# archivo de texto con las fechas contenidas en el TIFF
multilayer
}
}

#Genera ids para cada fila de acuerdo al grupo de acumulaci3n que
pertenezca, teniendo en cuenta la hora o el dia
#Ej: { 14/05/2015-12:05 } -> fechaInicial
# {{ 14/05/2015-12:10..}} toda la serie pertenece a un grupo de acumulacion
horaria, es decir todos esos datos se deben acumular, por lo tanto se les
asigna un mismo id para despu3s poderlos filtrar por ese id y realizar la suma
# { 14/05/2015-13:00 } -> fechaFinal
# Para el caso de acumulaci3n diaria, ser3a de 14/05/2015-00:05 a
15/05/2015-00:00
#columnOfDate solo puede valer "hourGroup" o "dayGroup"
generateDateGroupIds <- function(dfDataFiles, columnOfDate) {
  dfDataFiles$hourGroup <- -1
  dfDataFiles$dayGroup <- -1

  #fecha inicial de los calculos, se toma inicialmente al primer dato
  startDate = dfDataFiles[1,columnOfDate]
  #print(paste("sd:",startDate))
  minutes = as.numeric(format(startDate, "%M"))
  deltaMinutes = 5 #los datos son cada 5 minutos

  #La fecha inicial y final debe seguir el formato HH:05-(HH+1):00, pero la fecha
del primer dato no siempre es HH:05 (puede ser por ej HH:00 o HH:35) por lo
que se realiza calculos para obtener ese HH:05
#Si el minuto de la fecha inical es menor a 5 minutos (0 por ejemplo), indica
que la fecha inicial de ese grupo es una hora m3s atr3s
if (minutes < deltaMinutes) {
  startDate = startDate - 1*60*60 - minutes*60 + deltaMinutes*60
}
```




```
} else if (minutes > deltaMinutes) {  
  #si el minuto de la fecha inicial es mayor a 5 min, la fecha inicial es la fecha  
  inicial con minuto 5. Ej, si la hora inicial fue 14:20, la hora inicial debe ser  
  corregida a 14:05, si fue 12:40 se corrige a 12:05  
  startDate = startDate - minutes*60 + deltaMinutes*60  
}  
  
#teniendo la hora inicial corregida, se continua con la fecha, para ello se toma  
en cuenta la hora y fecha, debe seguir el formato yyyy/mm/dd 00:05 -  
yyyy/mm/dd (+1 dia) 00:00.  
startDateForDay = startDate  
hours = as.numeric(format(startDate, "%H"))  
if (hours > 0) { #si la hora inicial es mayor a 0, quitarle las horas para que  
quede la fecha con hora 00:05  
  startDateForDay = startDateForDay - hours*60*60  
}  
endDate = startDate + 1*60*60 - deltaMinutes*60 #la fecha final para  
acumulacion de horas, sera la fecha inicial sumado una hora y restada un delta  
es decir de HH:05 a HH(+1hora):(00-5min), ej de 02:05 a 02:55  
endDateForDay = startDateForDay + 24*60*60 - deltaMinutes*60 #la fecha  
final para acumulaci3n de dias, ser3 la fecha inicial sumado un dia y restado  
5min. Ej: de 11/02/2013-00:05 a 12/02/2013-00:00  
  
#Se empieza a recorrer cada elemento del data frame para obtener los que  
est3n dentro del rango de horas o fechas.  
idHourGroup = 1  
idDayGroup = 1  
for (i in 1:nrow(dfDataFiles)) {  
  currDate = dfDataFiles[i,columnOfDate]  
  repeat {  
    if (currDate >= startDate && currDate <= endDate) { #si la fila tiene su fecha  
    dentro del rango, asignarle un id  
      #print(paste(startDate, "-", endDate,"id:", idHourGroup))  
      dfDataFiles[i,"hourGroup"] = idHourGroup  
      break  
    } else { #si la fila tiene su hora fuera del rango asignado, mover el rango una  
    hora adelante e incrementar el id de hora ya que el nuevo dato pertenece a un  
    nuevo grupo de acumulaci3n  
      startDate = startDate + 1*60*60  
      endDate = endDate + 1*60*60  
      idHourGroup = idHourGroup + 1  
    }  
  }  
}  
  
repeat { #realizar lo mismo con los dias  
  if (currDate >= startDateForDay && currDate <= endDateForDay) {  
    dfDataFiles[i,"dayGroup"] = idDayGroup  
    break  
  }  
}
```



```
} else {  
  startDateForDay = startDateForDay + 24*60*60  
  endDateForDay = endDateForDay + 24*60*60  
  idDayGroup = idDayGroup + 1  
}  
}  
}  
}  
dfDataFiles  
}
```

Anexo 2. Cálculo de estadísticos de ajuste

```
setwd(".")  
  
library(hydroGOF)  
library(stringr)  
dirMergedData = "C:/r_resultados_fuerte/resultados/tiffsHora"  
fileMergedData = paste(dirMergedData, "/mergedData_etapa_60km.csv", sep =  
  "")  
  
mergedData <- read.table(fileMergedData, na.strings = "", sep = ",",  
  header=TRUE, stringsAsFactors = FALSE)  
columnas = names(mergedData)  
columnasPluvios = columnas[grepl("\\.x$", columnas)]  
columnasImag = columnas[grepl("\\.y$", columnas)]  
  
nameSplits = strsplit(basename(fileMergedData), "_")[[1]]  
institucion = nameSplits[2]  
radio = str_sub(nameSplits[3], 1, str_length(nameSplits[3])-4)  
  
max = max(unlist(mergedData[,c(columnasPluvios, columnasImag)]))  
  
## Lectura de las estimaciones de precipitación por los pluviómetros  
#pluv<- read.delim("Pluviometros.txt", header=TRUE, sep="\t")  
## Lectura de las estimaciones de precipitación por el satélite  
#imerg3<- read.delim("3imerg.txt", header=TRUE, sep="\t")  
  
## Guardar en la variable ne el número de columnas (= número de estaciones)  
ne<-ncol(pluv)  
ne<-length(columnasPluvios)  
  
datosPluvios = mergedData[,columnasPluvios]  
datosImag = mergedData[,columnasImag]  
  
## bias de todos los pluvios  
dfBias = data.frame(pluvios=columnasPluvios, valor=NA)
```



```
dfBias2 = data.frame(pluvios=columnasPluvios, valor=NA)
dfABias = data.frame(pluvios=columnasPluvios, valor=NA)
dfRmse = data.frame(pluvios=columnasPluvios, valor=NA)
dfPABias = data.frame(pluvios=columnasPluvios, valor=NA)
dfrsquared = data.frame(pluvios=columnasPluvios, valor=NA)
for (i in 1:ncol(datosImag)) {
  numObs = length(datosPluvios[,i])
  dfBias$valor[i] = 100*sum(datosImag[,i] - datosPluvios[,i]) / numObs
  dfRmse$valor[i] = paste("rmse",sqrt(sum((datosImag[,i] - datosPluvios[,i])**2)) /
numObs)
  dfBias2$valor[i] = sum(datosPluvios[,i] - datosImag[,i]) / numObs
  dfABias$valor[i] = sum(abs(datosPluvios[,i] - datosImag[,i])) / numObs

  x=datosPluvios[,i]
  y=datosImag[,i]
  n = length(x)
  numerador=n*sum(x*y)-sum(x)*sum(y)
  denominador=sqrt( (n*sum(x*x) - sum(x)^2)*(n*sum(y*y)-sum(y)^2))
  r=numerador/denominador
  dfrsquared$valor[i]=round(r*r,3)

  xy = sum(datosPluvios[,i] + datosImag[,i])/ 2 / numObs
  print(xy)
  dfPABias$valor[i] = dfABias$valor[i] / xy * 100
  #print(paste("rmse",sqrt(sum((datosImag[,i] - datosPluvios[,i])**2)) /
length(datosPluvios[,i])))
  #print(paste("rmse2",rmse(datosImag[,i], datosPluvios[,i])))
}
```

Anexo 3. Test de significancia

```
y<-c(0.029, 0.058, 0.032, 0.029)
x<- c(0.027, 0.047, 0.027, 0.028)
t.test(x,y)
```

Welch Two Sample t-test



data: x and y

$t = -0.5532$, $df = 5.369$, $p\text{-value} = 0.6024$

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

95 percent confidence interval:

-0.02637366 0.01687366

sample estimates:

mean of x mean of y

0.03225 0.03700



Anexo 4. Figuras de los errores estadísticos ABS-BIAS

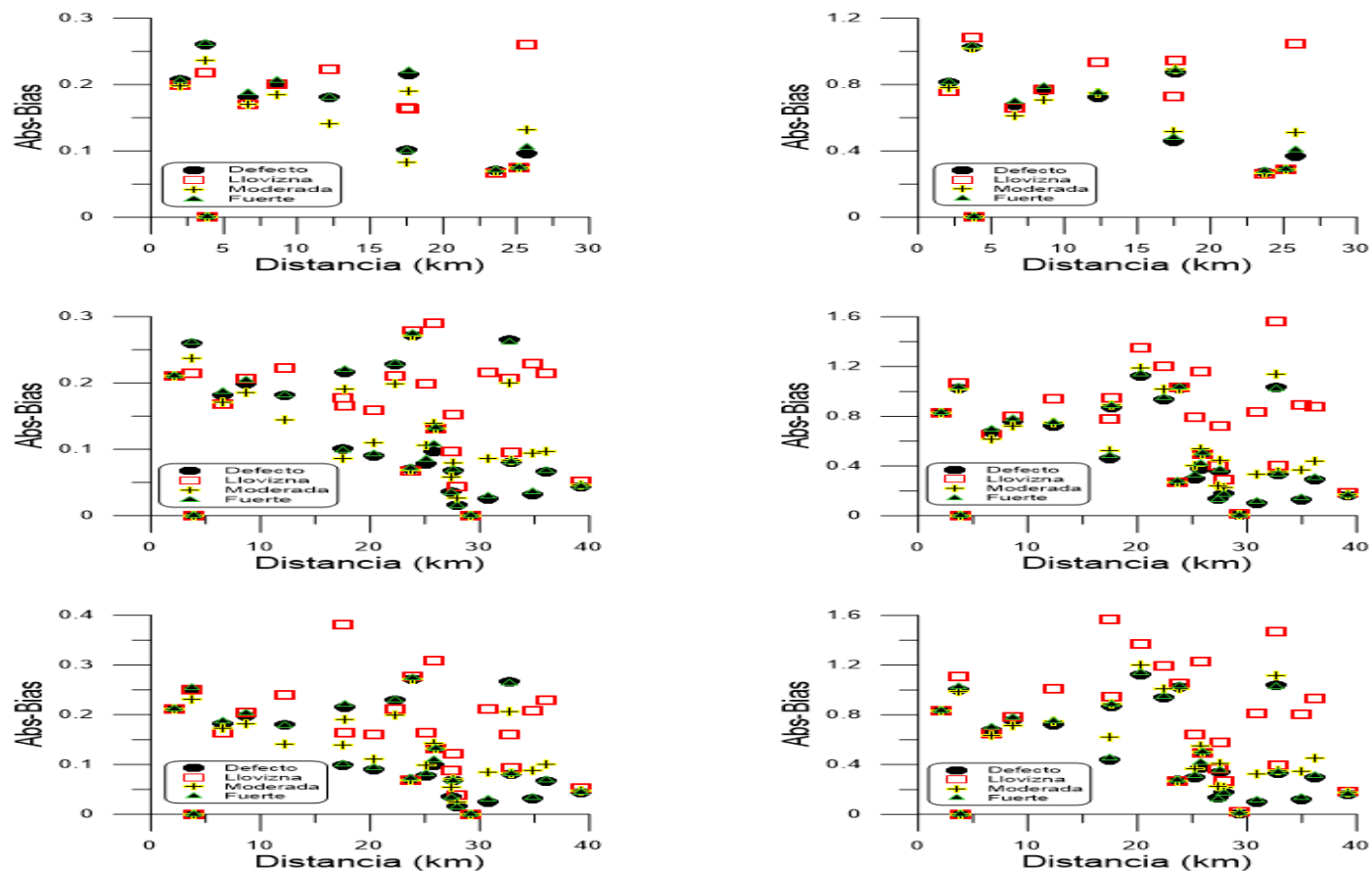


Figura A4. 1 Abs-Bias frente a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde) a la izquierda a la estacionalidad de 15 min y a la derecha a la estacionalidad de una hora, de arriba hacia abajo 100, 250 y 500 metros de resolución respectivamente.

Raíz del error medio cuadrado (RMSE)

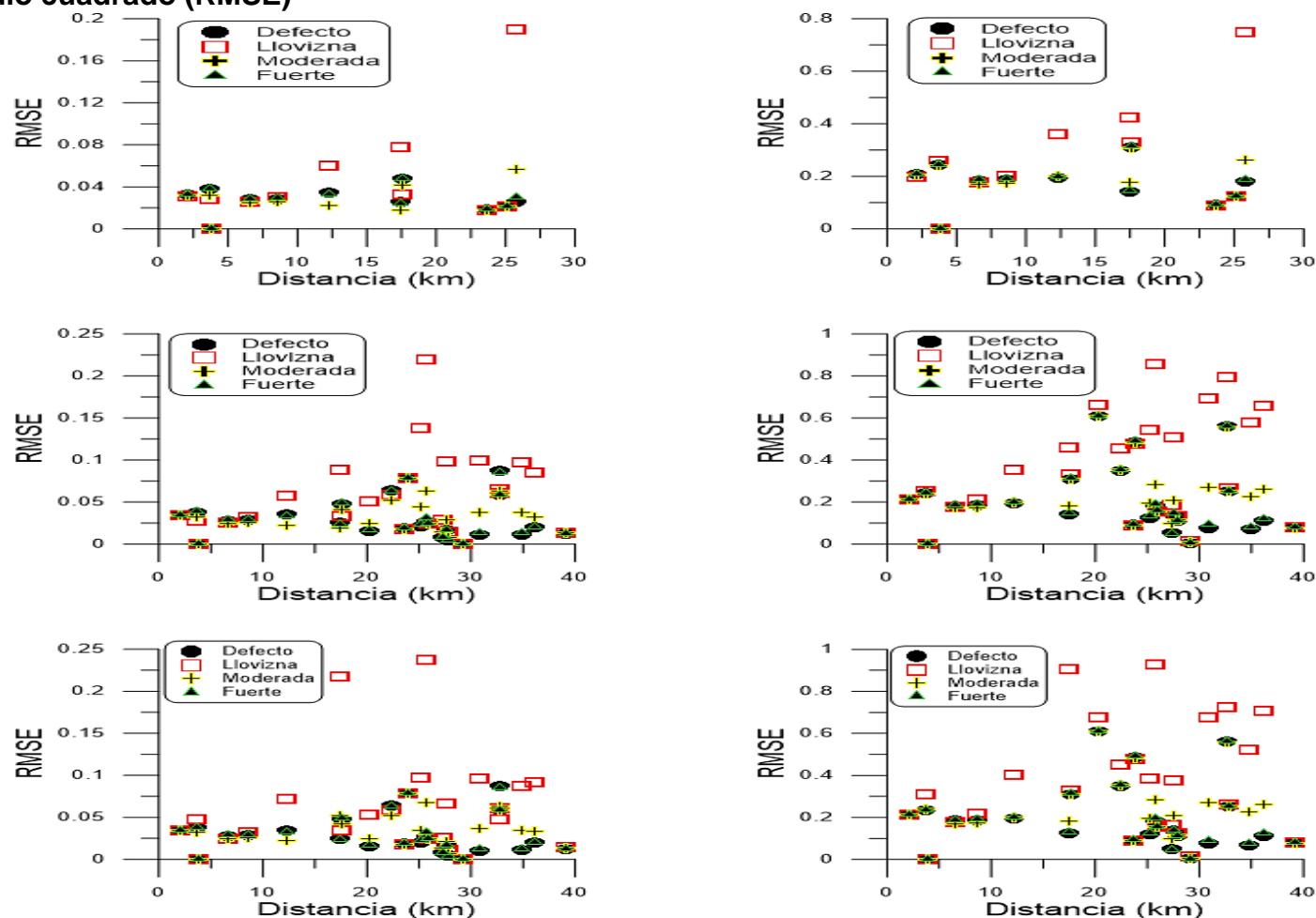


Figura A4.2 Raíz del error medio al cuadrado (RMSE) frente a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde) a la izquierda a la estacionalidad de 15 min y a la derecha a la estacionalidad de una hora, de arriba hacia abajo 100, 250 y 500 metros de resolución respectivamente.

Coeficiente de determinación R^2

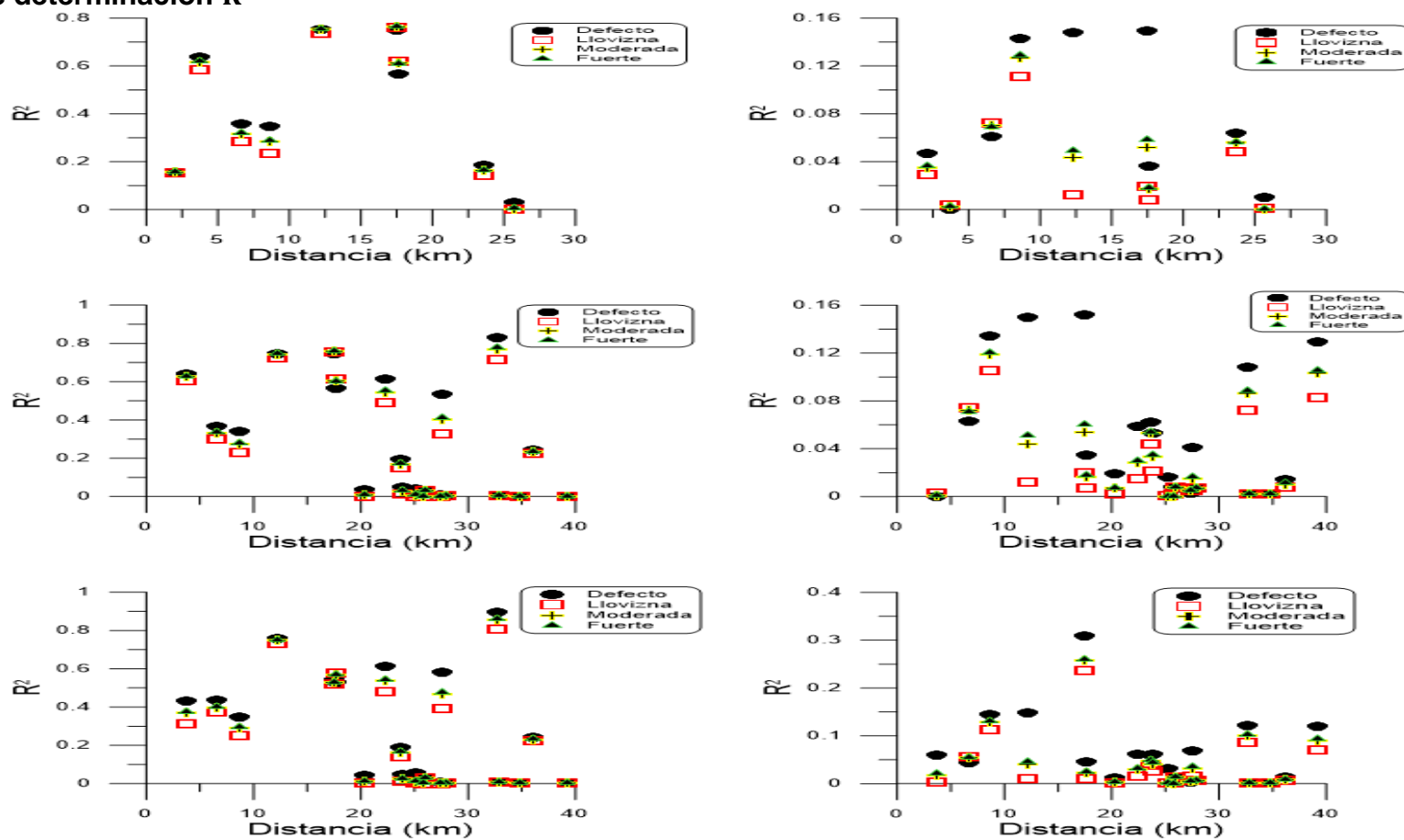


Figura A4.3 Coeficiente de determinación R^2 frente a la distancia al radar para las cuatro ecuaciones del radar defecto (negro), llovizna (rojo), moderada (amarillo), y fuerte (verde) a la izquierda a la estacionalidad de 15 min y a la derecha a la estacionalidad de una hora, de arriba hacia abajo 100, 250 y 500 metros de resolución respectivamente.